

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

OHŘEV ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

ELECTRIC ARC HEATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Kahoun

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Karel Kahoun

ID: 164813

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Ohřev elektrickým obloukem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte průmyslové aplikace ohřevu elektrickým obloukem.
2. Popište funkci laboratorního přípravku pro generaci elektrického oblouku.
3. Na laboratorním přípravku pro generaci elektrického oblouku změřte a poté vyhodnoťte závislost přenosu tepla z elektrického oblouku do vsázky na procházejícím proudu elektrickým obloukem při různých povrchových úpravách vsázky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. Praha: SNTL, 1967.
- [2] GROSS, Boleslav a Otto HAVELKA. Elektrické přístroje II. 2. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1980.
- [3] HAVELKA, Oto. Elektrické přístroje I. Praha: SNTL, 1985. [4] WUNSCH, Edgar. Elektrické obloukové pece. Praha: SNTL, 1964

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 31.5.2017

Vedoucí práce: Ing. David Šimek

Konzultant bakalářské práce:

7doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá ohřevem elektrickým obloukem v průmyslových aplikacích. V bakalářské práci je popsán laboratorní přípravek pro generaci elektrického oblouku. Obsahem je také teoretický rozbor přenosu tepla z elektrického oblouku do blízkých předmětů. Hlavní část práce obsahuje experimentální měření přenosu tepla z elektrického oblouku do blízkého předmětu v závislosti na velikosti elektrického výkonu oblouku a v závislosti na povrchové úpravě předmětu.

Abstract

This bachelor's thesis deals with an arc heating in industrial applications. In this paper, there is described laboratory equipment for the generation of electric arc. Thesis also contains theoretical analysis of heat transfer from the arc to nearby object. The main part of the thesis is devoted to experimental measurement of heat transfer from the arc to the nearby object in relation to the electrical power and the surface finish of the object.

Klíčová slova

Elektrický oblouk, oblouková pec, svařování, přenos tepla.

Keywords

Electric arc, arc furnace, welding, heat transfer.

Bibliografická citace

KAHOUN, K. *Ohřev elektrickým obloukem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Šimek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Ohřev elektrickým obloukem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

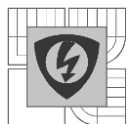
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Šimkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

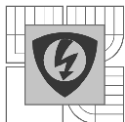
V Brně dne

Podpis autora

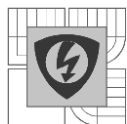


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	13
2 ELEKTRICKÝ OBLOUK	14
2.1 STEJNOSMĚRNÝ ELEKTRICKÝ OBLOUK.....	16
2.2 STŘÍDAVÝ ELEKTRICKÝ OBLOUK	16
3 OHŘEV ELEKTRICKÝM OBLOUKEM V PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍCH	18
3.1 OBLOUKOVÉ PECE	18
3.1.-1 ELEKTRICKÉ OBLOUKOVÉ PECE DĚLÍME PODLE HOŘENÍ OBLOUKU:	19
3.1.-2 ELEKTRICKÉ SCHÉMA OBLOUKOVÉ PECE	20
3.1.-3 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM OBLOUKOVÉ PECE	21
3.2 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	22
3.2.-1 SVAŘOVÁNÍ RUČNÍ OBALENOU ELEKTRODOU	22
3.2.-2 SVAŘOVÁNÍ NETAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V ATMOSFÉŘE INTERNÍHO PLYNU – TIG.....	24
3.2.-3 SVAŘOVÁNÍ TAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V OCHRANNÉM PLYNU METODOU MIG/MAG	25
3.3 ŘEZÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	25
4 PŘENOS TEPLA Z ELEKTRICKÉHO OBLOUKU DO BLÍZKÝCH PŘEDMĚTŮ	26
4.1 ŠÍŘENÍ TEPLA VEDENÍM	26
4.2 ŠÍŘENÍ TEPLA PROUDĚNÍM	27
4.3 ŠÍŘENÍ TEPLA SÁLÁNÍM	27
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PŘENOSU TEPLA Z ELEKTRICKÉHO OBLOUKU DO BLÍZKÉHO PŘEDMĚTU	30
5.1 LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK PRO GENERACI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	30
5.2 SEZNAM PŘÍSTROJŮ POUŽITÝCH PRO MĚŘENÍ	31
5.2.-1 MĚŘÍCÍ ÚSTŘEDNA ALMEMO® 5690-2	31
5.2.-2 VÁHA RADWAG AS 60/220.R2.....	33
5.3 VOLBA VHODNÉ VSÁZKY	34
5.4 IZOLANT.....	37
5.5 POSTUP PŘI PŘÍPRAVĚ PŘÍPRAVKU NA GENERACI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	38
5.6 MĚŘENÍ PŘENOSU TEPLA Z ELEKTRICKÉHO OBLOUKU GENEROVANÉM LABORATORNÍM PŘÍPRAVKEM DO VSÁZKY	40
5.7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	42
5.7.-1 VÝPOČET TEPLA	42
6 ZÁVĚR.....	49
LITERATURA	51



PŘÍLOHY	52
PŘÍLOHA A	52
PŘÍLOHA B.....	53
PŘÍLOHA C	55



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Rozložení teploty v oblouku [3]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2 - Přechodová charakteristika elektrických výbojů [1]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3 - Průběh potenciálu v oblouku [1]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 4 - Dynamické charakteristiky střídavého oblouku [2]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5 - Oblouková pec ocelářská s přímým obloukem [2]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 6 - Oblouková pec s nepřímým (nezávislým, sálavým) obloukem [2]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 7 - Oblouková pec se zakrytým obloukem [2]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 8 - Různá zapojení vedení od transformátoru k elektrodám obloukové pece [2]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 9 - Schéma připojení elektrody k síti v ocelářské obloukové peci [2]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 10 - Náhradní elektrické schéma přívodu k elektrodě obloukové pece [2]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 11 - Kružnicový diagram obloukové pece [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 12 - Schéma svařování ruční obalenou elektrodou [4]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 13 - Schéma svařování netavicí se elektrodou v atmosféře interního plynu – TIG [6] ...</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 14 - Schéma svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou [7]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 15 - Šíření tepla vedením [10]</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 16 - Šíření tepla prouděním [12]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 17 - Sdílení tepla sáláním</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 18 - Schéma zapojení přípravku pro generaci elektrického oblouku [9]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 19 - Zapojení přípravku pro generaci elektrického oblouku</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 20 - Schéma termočlánu [14]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 21 - Váha RADWAG AS 60/220.R2 [13]</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 22 – Schéma vzorku mědi připravený k měření</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 23 - Vzorky v konečné podobě seřazeny od vzorku č.1 po vzorek č. 11</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 24 - Vzorek umístěn do izolace</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 25 - Detail uhlíkových elektrod před zapálením elektrického oblouku s připraveným vzorkem s izolací</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 26 - Elektrody po zhasnutí oblouku s přidavnou izolací</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 27 - Stojan s tepelnou izolací</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 28 - Teoretická oteplovací charakteristika [18]</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 29 - Závislost tepla na proudu při vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku $l = 60 \text{ mm}$</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 30 - Závislost tepla na proudu při vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku $l = 70 \text{ mm}$</i>	<i>45</i>

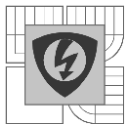


Obrázek 31 - Závislost tepla na proudu při vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku $l = 80 \text{ mm}$	45
Obrázek 32 - Závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 4 \text{ A}$	47
Obrázek 33 - Závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 6 \text{ A}$	47
Obrázek 34 - Závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 8 \text{ A}$	48
Obrázek 35 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 4 \text{ A}$	52
Obrázek 36 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 6 \text{ A}$	52
Obrázek 37 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 8 \text{ A}$	53
Obrázek 38 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 4 \text{ A}$	53
Obrázek 39 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 6 \text{ A}$	54
Obrázek 40 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 8 \text{ A}$	54
Obrázek 41 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 4 \text{ A}$	55
Obrázek 42 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 6 \text{ A}$	55
Obrázek 43 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 8 \text{ A}$	56



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Seznam fyzikálních veličin, které měřicí jednotka ALMEMO umožňuje měřit [14] ...</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 2 - Závislost termoelektrického napětí na teplotě naměřené termočlánkem</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 3 - Seznam použitých přístrojů</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 4 - Povrchová úprava vzorků</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 5 - Tabulka hmotnosti vzorků</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 6 - Vlastnosti plastu při teplotě 20 °C [15] [16] [17]</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 7 - Vypočítané absorbované teplo pro $l = 60 \text{ mm}$</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 8 - Vypočítané absorbované teplo pro $l = 70 \text{ mm}$</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 9 - Vypočítané absorbované teplo pro $l = 80 \text{ mm}$</i>	<i>44</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
θ	Oteplení	[°C]
d	Průměr	[mm]
U	Napětí	[V]
I	Proud	[A]
t	Čas	[s]
f	Frekvence	[Hz]
R	Elektrický odpor	[Ω]
L	Elektrická indukce	[H]
P	Činný výkon	[W]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
Q	Jalový výkon	[Var]
j	Proudová hustota	[A·m ⁻²]
σ	Stefanova-Boltrmannova konstanta	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]
ε	Emisivita předmětu	[-]
S	Obsah	[m ²]
m	Hmotnost	[g]
Q	Teplo	[J]
λ	Tepelná vodivost	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
δ	Tloušťka	[mm]
l	Délka	[mm]
c	Měrná tepelná kapacita	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg m ⁻³]



1 Úvod

Elektrický oblouk je v praxi ve větší míře nežádoucí. Vyskytuje se nejčastěji při spínání a rozepínání kontaktů spínacích přístrojů. Zde je používáno zhášedel pro rychlejší uhašení elektrického oblouku. Hořící elektrický oblouk vyzařuje velké množství energie. Tato energie je ve formě tepla, světla a elektromagnetického pole. Teplo je část vnitřní energie, která je přenesena mezi vícero soustavami.

Elektrický oblouk odvádí do okolí teplo třemi způsoby. Prvním způsobem je vedení, dále prouděním a sáláním. Teplo vyzářené z elektrického oblouku je v praxi používáno především v hutnictví a svářečských technologiích. V hutnictví se elektrický oblouk používá jako zdroj tepla v obloukových pecích. Teplo z elektrického oblouku zde slouží k výrobě oceli ze surového železa nebo jiných slitin.

Při svařování se teplo odvedené z oblouku používá na roztavení dvou materiálů. Tyto materiály následně v místě roztavení spojíme v jeden. Vlastnosti svaru závisí na použité technologii svařování a vlastnostech spojovaných materiálů.

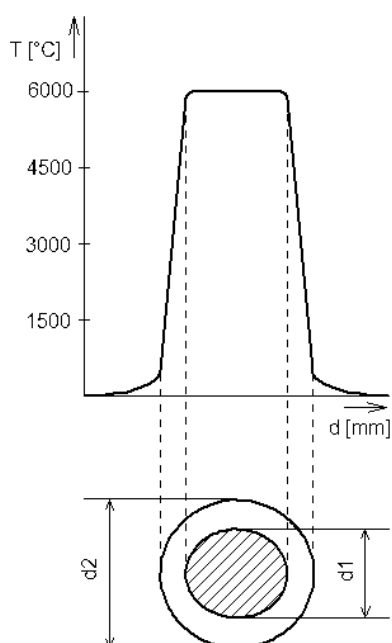
Hoření nežádoucího elektrického oblouku v elektrických přístrojích má za následek zkrácení životnosti přístroje. Vysoká teplota deformuje materiály v okolí hořícího oblouku. Je zde možnost natavení kontaktů a následné svaření. Dále je nebezpečný výskyt elektrického oblouku v hořlavém prostředí.

Vyzářená energie ve formě světla se využívala v historii v obloukových lampách jako zdroj světla. Tyto lampy jsou neefektivní a postupem času byly nahrazeny jinými světelnými zdroji s větší účinností.

2 ELEKTRICKÝ OBLOUK

Elektrický oblouk je samostatný elektrický výboj, hořící mezi dvěma elektrodami. Působí-li na elektrický oblouk elektromagnetické pole nebo proudící prostředí, je pohyblivý. Samostatně existuje po libovolnou dobu, jestliže není přerušen zásahem do jeho mechanismu. Jako hlavní vlastnosti oblouku považujeme:

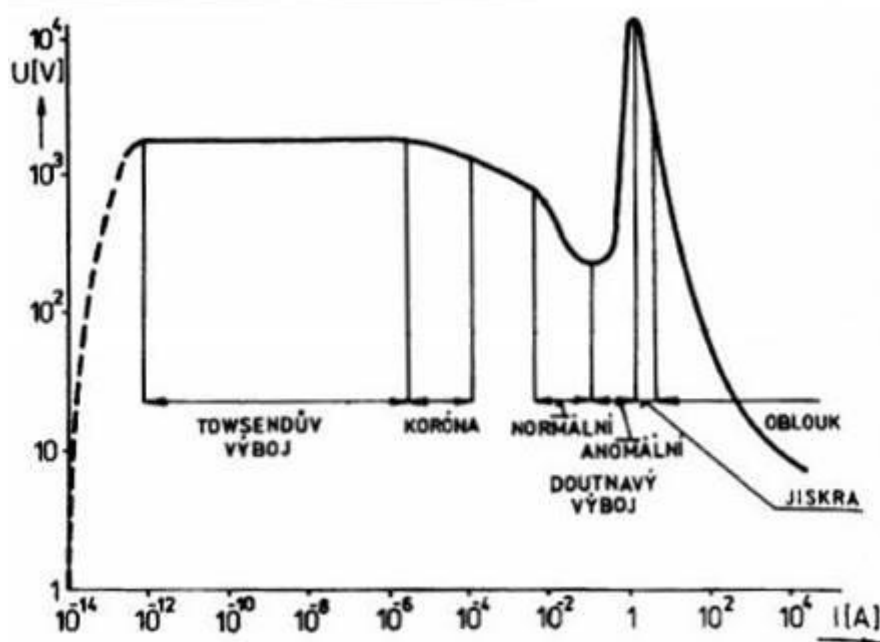
- malé napětí mezi elektrodami,
- vysoký proud procházející elektrickým obloukem,
- vysoká teplota katodové skvrny,
- vysoká hustota proudu katodové skvrny,
- malé elektrodové úbytky,
- kvazi-neutralita,
- kolektivní chování částic,
- vyzařování energie z elektrod a z plazmatu.



- d1 jádro oblouku (ionizovaný plyn)
d2 aureola (disociovaný plyn)

Obrázek 1 - Rozložení teploty v oblouku [3]

Oblouky dělíme na stejnosměrný a střídavý, podle druhu napájecího proudu.



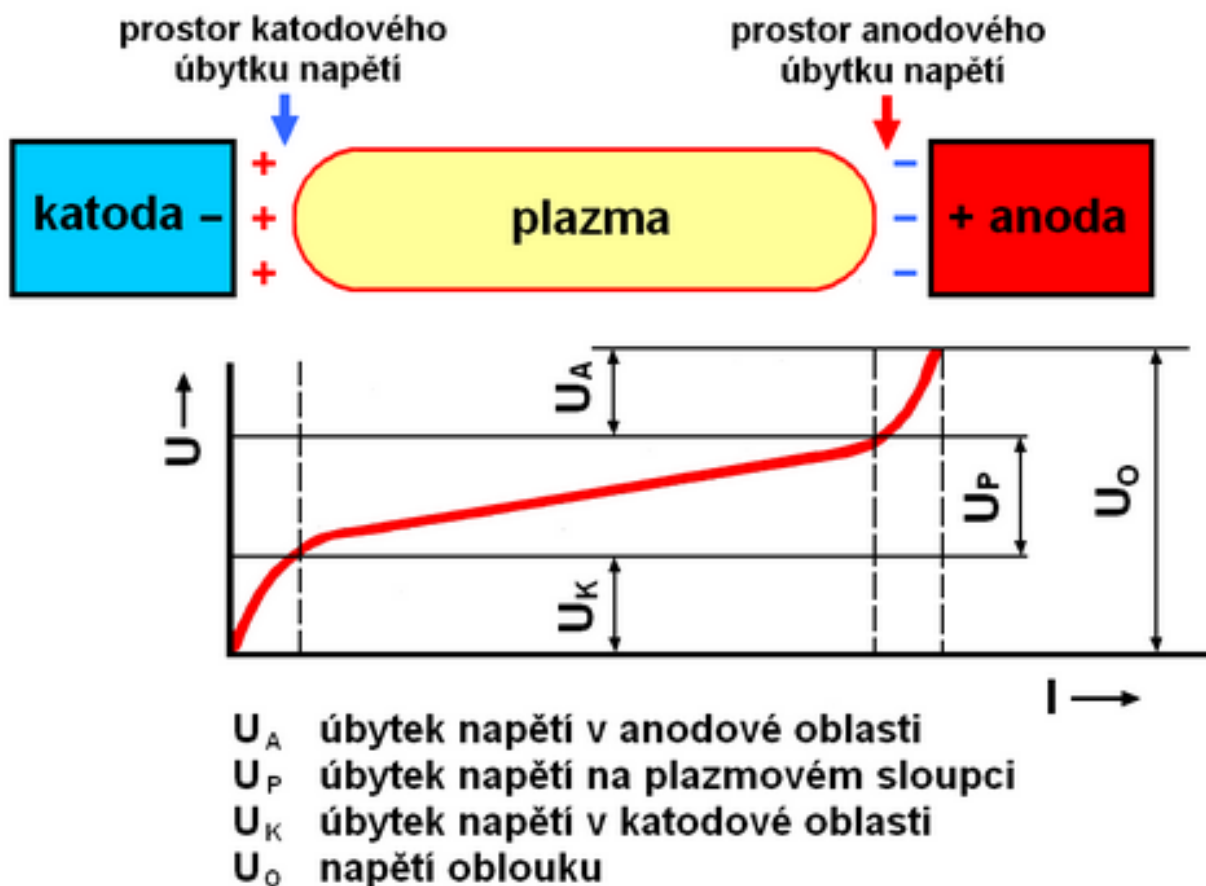
Obrázek 2 - Přechodová charakteristika elektrických výbojů [1]

Oblouk vzniká velmi rychle, řádově 10^{-6} s. Při vzniku elektrického oblouku mají elektrony, ionty a neutrální atomy stejnou teplotu, to znamená, že jsou v termické rovnováze.

Jestliže převládají rekombinační pochody nad ionizačními, oblouk zaniká.

Oblouk lze zhaset:

- rychlým oddálením elektrod od sebe,
- přetržením oblouku na více místech,
- vyfouknutím oblouku magnetickým polem do zhasací komory,
- v olejové lázni,
- expanzí vody nebo oleje,
- stlačeným plynem.



Obrázek 3 - Průběh potenciálu v oblouku [1]

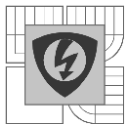
V blízkosti elektrod potenciál roste výrazně rychleji než mezi elektrodami, tuto oblast nazýváme katodový a anodový úbytek. Katodový a anodový úbytek závisí na materiálu elektrod. Lineárně rostoucí část křivky mezi elektrodami znázorňuje průběh potenciálu v oblouku. [1]

2.1 Stejnosměrný elektrický oblouk

Jestliže připojíme dvě dotýkající se elektrody za normálních podmínek na zdroj stejnosměrného napětí, začíná se ve styku mezi nimi vybavovat teplo. Vlivem tepla dochází k termické emisi elektronů z katody do blízkého okolí kontaktního styku. Pomalým oddalováním elektrod od sebe vzniká elektrický oblouk, který hoří ve vzduchu a parách materiálu elektrod. Teplota oblouku je závislá na tlaku okolních plynů. S rostoucím tlakem roste i teplota. Aby vznikl oblouk musí být tedy katoda nažhavená, u anody to není podmínkou. Oblouk může vzniknout i za studené anody. Dále je nutné mít přivedené napětí minimálně 15 – 20 V. Pokud vzdálenost elektrod vzroste, vzniká větší odpor na oblouku, například chlazením, tím pádem pro udržení hořícího oblouku je nutný vzrůst napětí. [2]

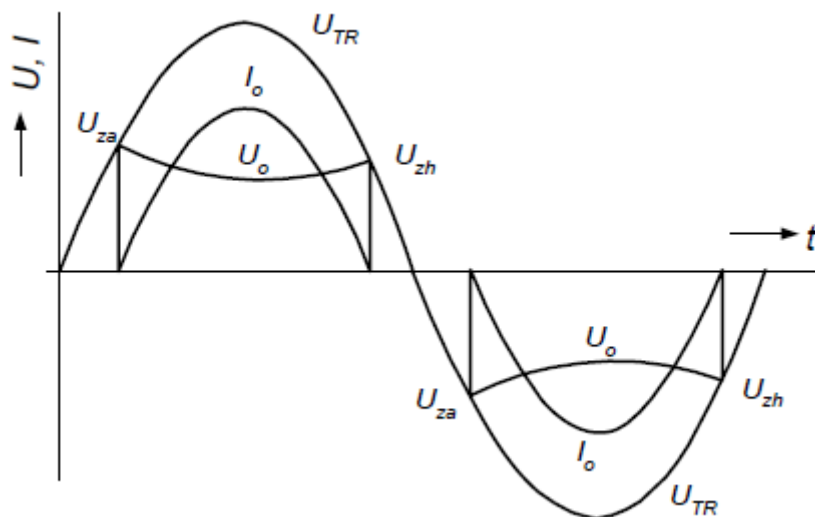
2.2 Střídavý elektrický oblouk

Když se začne měnit polarita proudu napájecího oblouk, oblouk při průchodu nulou zhasíná. Oblouk zapálí znovu, pokud rekombinační procesy nejsou dostatečně rychlé, obecně



řečeno, že izolační pevnost média mezi elektrodami musí být nižší než napětí na elektrodách. Pokud jsou tyto podmínky splněny, oblouk hoří v obou periodách.

Při změně polarity je anoda obklopena mrakem elektronů. Z anody se stává katoda s velkým prostorovým nábojem. Náboj se přesouvá k nové anodě. Tento proces trvá určitou dobu. Za tuto dobu elektrony zchladnou, a proto nové zapálení oblouku potřebuje vyšší napětí. [2]



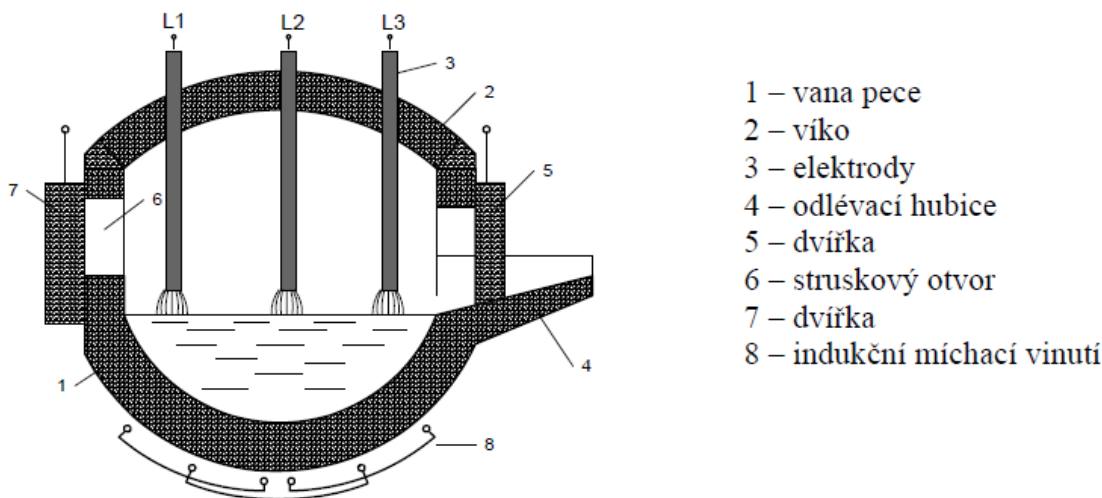
Obrázek 4 - Dynamické charakteristiky střídavého oblouku [2]

3 OHŘEV ELEKTRICKÝM OBLOUKEM V PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍCH

Elektrický oblouk je zdrojem velmi vysoké teploty. Sloupec volně hořícího oblouku dosahuje teploty 4000 – 7000 °C. Takto vysoká teplota se používá v obloukových pecích, při svařování, nebo při řezání různých materiálů.

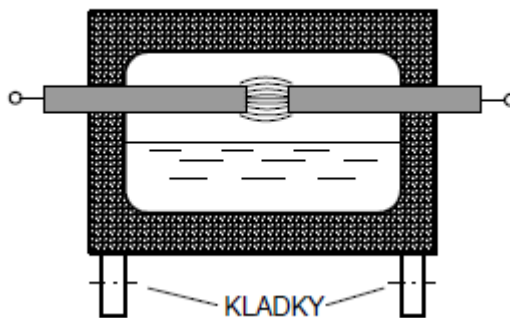
3.1 Obloukové pece

Elektrické obloukové pece jsou využívány v metalurgii například pro výrobu oceli ze surového železa. Nejčastěji se stavějí pece na střídavý trojfázový proud. Oblouk zde hoří z tří elektrod proti vsázce. Teplo se odvádí z oblouku do vsázky především sáláním, ve vsázce se dále šíří vedením a prouděním. Obloukový ohřev je závislý na materiálu elektrod a na délce oblouku. Teplo je úměrné druhé mocnině protékajícího proudu obloukem. Na (Obrázek 5) je znázorněna oblouková pec ocelářská s přímým obloukem. Skládá se z 1 - vana pece, 2 - víko, 3 - elektrody (grafitové nebo uhlíkové), 4 - odlévací hubice, 5 - dvířka, 6 - struskový otvor, 7 - dvířka, 8 - indukční míchací vinutí. Indukční míchací vinutí je zde z důvodu nedostatečného promíchávání, které zde vzniká elektrodynamickými silami. Indukční míchací zařízení míchá vázku pomocí nízkofrekvenčního magnetického pole s frekvencí 1 Hz až 2 Hz.



Obrázek 5 - Oblouková pec ocelářská s přímým obloukem [2]

Výjimečně jednofázové pece se sálavým obloukem.

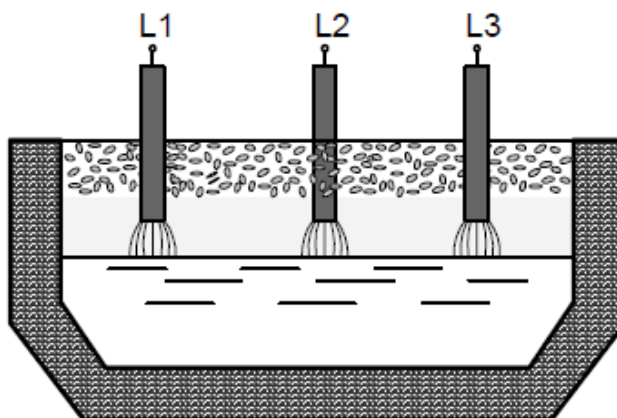


Obrázek 6 - Oblouková pec s nepřímým (nezávislým, sálavým) obloukem [2]

Hlavní částí obloukové pece je pecní regulační transformátor, který napájí elektrody. Je zde velmi důležitá samočinná regulace polohy elektrod, aby oblouk hořel nepřerušovaně a za co nejstálějších podmínek. Grafitové elektrody mají průměr od 100 mm až do 800 mm. Proudův v oblouku mívají hodnoty řádově 10^5 A, při napětí do 550 V. Tím pádem je zde velmi vysoký příkon, dosahující stovek megawattů. Cesta proudu z transformátoru na elektrody se nazývá krátká cesta, vedení je navrženo tak, aby odolalo vysokým proudům. [2]

3.1.-1 Elektrické obloukové pece dělíme podle hoření oblouku:

- a) **Pece s přímým obloukem.** V těchto pecích hoří oblouk přímo mezi elektrodami a vázkou (Obrázek 5). Elektrody nejsou ponořeny ve vázce.
- b) **Pece s nepřímým obloukem.** Zde oblouk hoří mezi dvěma elektrodami. Teplo se do sázky předává výhradně sáláním (Obrázek 6).
- c) **Pece se zakrytým obloukem.** Elektrody jsou ponořené ve vázce a oblouk je zcela zakryt. Část proudu prochází také mezi elektrodami struskou a zavážkou, v horkém stavu dobře vodící. Z průchodu proudu vzniká odpor a tím pádem odporový ohřev (Obrázek 7). [2]



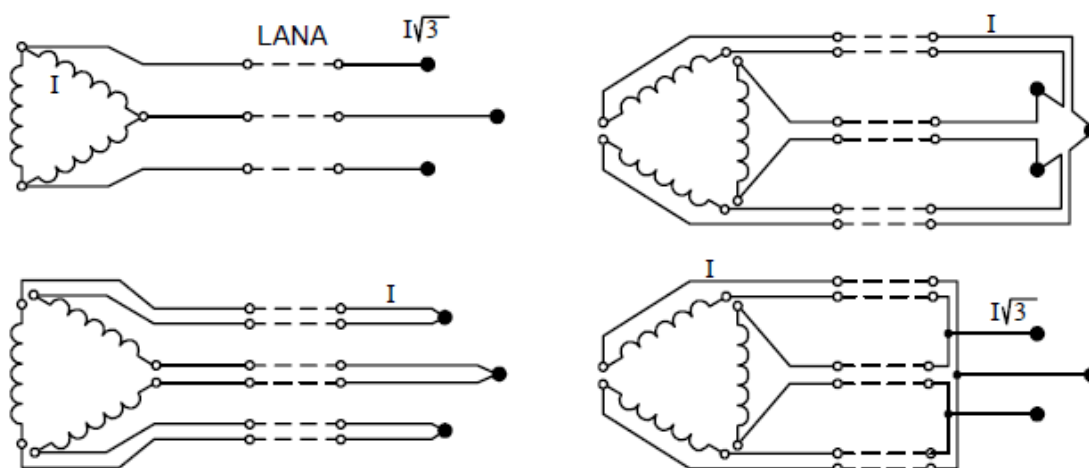
Obrázek 7 - Oblouková pec se zakrytým obloukem [2]

3.1.-2 Elektrické schéma obloukové pece

Připojení ocelářské pece k síti vysokého napětí je schematicky zakresleno na (Obrázek 9). Odpojovač zajišťuje tvrdé odpojení od sítě. Je řízen dálkově z řídicího panelu, stejně tak vypínač a vyřazovací spínač tlumivky. Ochrany proti zkratu a přetížení se nacházejí na měřících transformátorech proudu a napětí. Dále zde jsou nainstalovány veškerá měřící zařízení, např. ampérmetry, voltmetry, elektroměr.

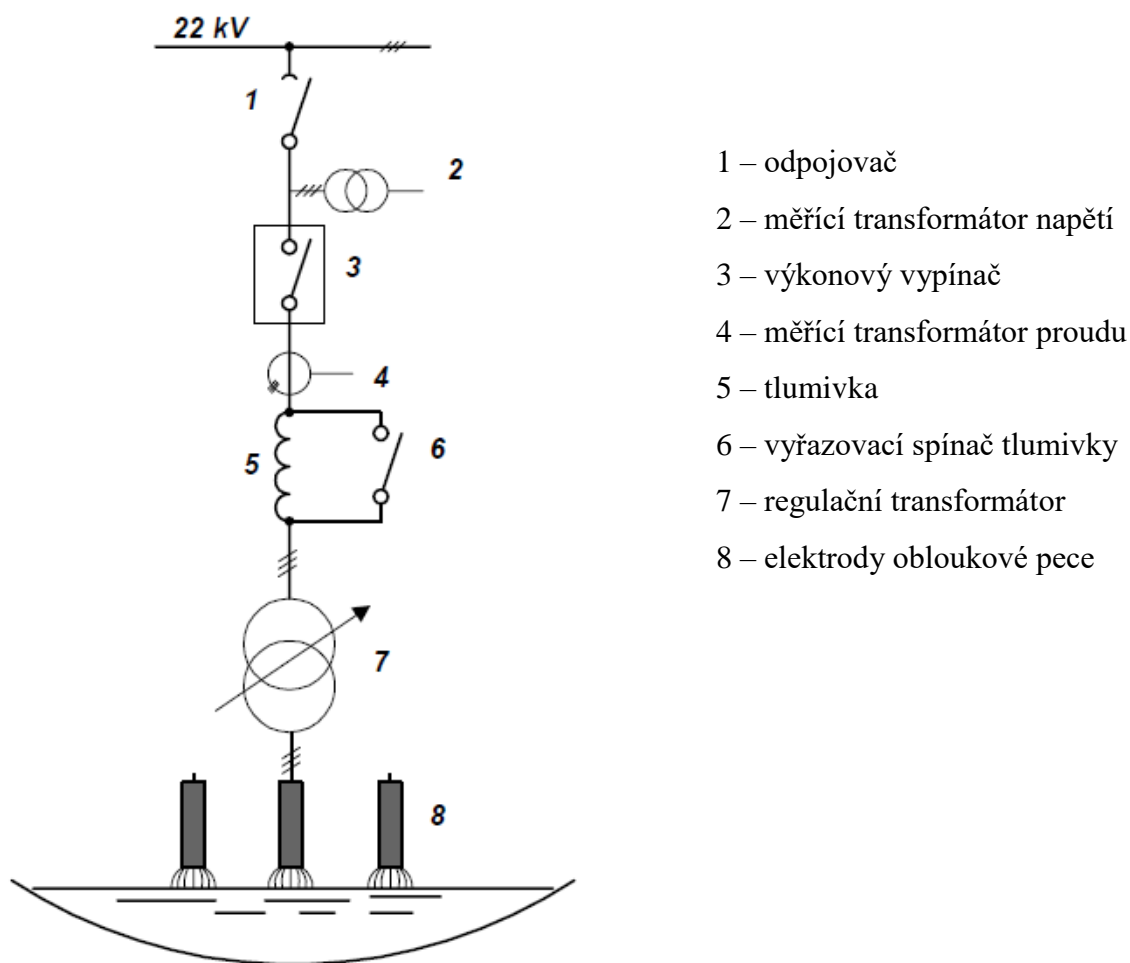
Některé pece mají až stovky tun. S takto těžkými pecemi je velmi obtížné řízení a manipulace např. odklápění víka, naklánění vany při vypouštění vsázky i strusky. Z tohoto důvodu smí s pecí manipulovat jen prověřený a zkušený pracovník.

Další důležitá věc je chlazení pece. Pec se chladí průtokem vody. Chladí se víka pece, vyzdívky pece, elektrody a lanové přívody proudu k elektrodám. Průtok vody je automaticky řízen speciálním elektrickým zařízením.



Obrázek 8 - Různá zapojení vedení od transformátoru k elektrodám obloukové pece [2]

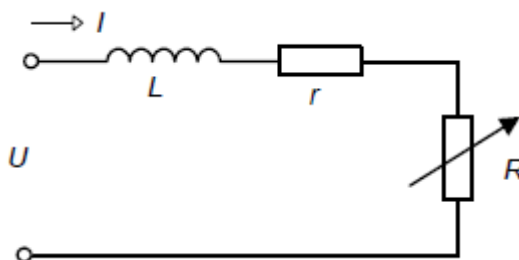
Velmi důležitým zařízením jsou pecní transformátory pro obloukové pece. Transformátory se používají převážně trojfázové olejové a regulační pod zatížením. Vstupní vinutí transformátoru je pro vysoké napětí z důvodu vysokých výkonů. Výstupní vinutí transformátoru je zapojené do trojúhelníku. Nebo se do trojúhelníku spojuje až za vodícími lany (Obrázek 8). [2]



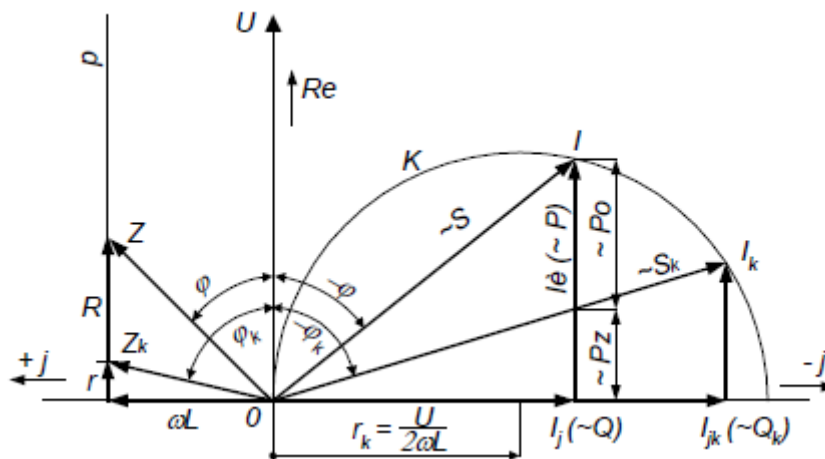
Obrázek 9 - Schéma připojení elektrody k síti v ocelářenské obloukové peci [2]

3.1.-3 Kružnicový diagram obloukové pece

V kružnicovém diagramu se nachází pracovní charakteristiky pece. Z těchto charakteristik získáváme správné hodnoty proudu a natavení polohy elektrod pro jednotlivé stupně napětí. Pro kružnicový diagram se volí pouze jedna fáze. Náhradní elektrické schéma přívodu k elektrodě obloukové pece můžeme vidět na (Obrázek 10). Indukčnost L představuje indukčnost jedné fáze, tj. přívodů, krátké cesty, pecního transformátoru atd. Činný odpor r , stejně jako indukčnost, označuje činný odpor jedné fáze. R je odpor oblouku, který je závislý na délce oblouku.



Obrázek 10 - Náhradní elektrické schéma přívodu k elektrodě obloukové pece [2]



Optimální hodnoty v (*Obrázek 11*) mají index o . To znamená, že odpor oblouku se musí číselně rovnat impedanci celého přívodu k němu. Roste-li délka oblouku, proud se pohybuje po kružnici doleva, to znamená, že proud roste. Zkracuje-li se oblouk, proud se pohybuje na opačnou stranu a tím pádem velikost proudu klesá.

Výkon pece závisí na velikosti proudu obloukové pece. S rostoucím proudem roste výkon do určité hranice, dále již výkon neroste a rostou pouze ztráty pece.

3.2 Svařování elektrickým obloukem

Obloukové svařování je nejpoužívanějším typem svařování v praxi. energii potřebnou pro roztavení svařovaných materiálů dodává elektrický oblouk ve formě tepla.

3.2.-1 Svařování ruční obalenou elektrodou

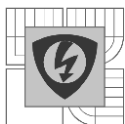
Nejjednodušší obloukové svařování se provádí pomocí obalené elektrody. Elektrický oblouk zde hoří mezi základním materiálem a tavnou elektrodou s obalem. Základním materiálem je myšlena tavná lázeň. Při sváření se elektrody odtavují a kov se ukládá do svarové lázně a tím dochází k vytvoření svarového spoje. Na povrchu se vytváří struska z odtaveného obalu, kterou je nutno následně dobře odstranit.

Proud na elektrodě se nastavuje:

- pro elektrody s kyselým a rutilovým obalem $I [A]$
 $I = (40 \text{ až } 55) \cdot d$
- pro elektrody s bazickým obalem $I [A]$
 $I = (35 \text{ až } 50) \cdot d$

kde d je průměr jádra elektrody.

Napětí na elektrickém oblouku je dáno statickou charakteristikou oblouku.

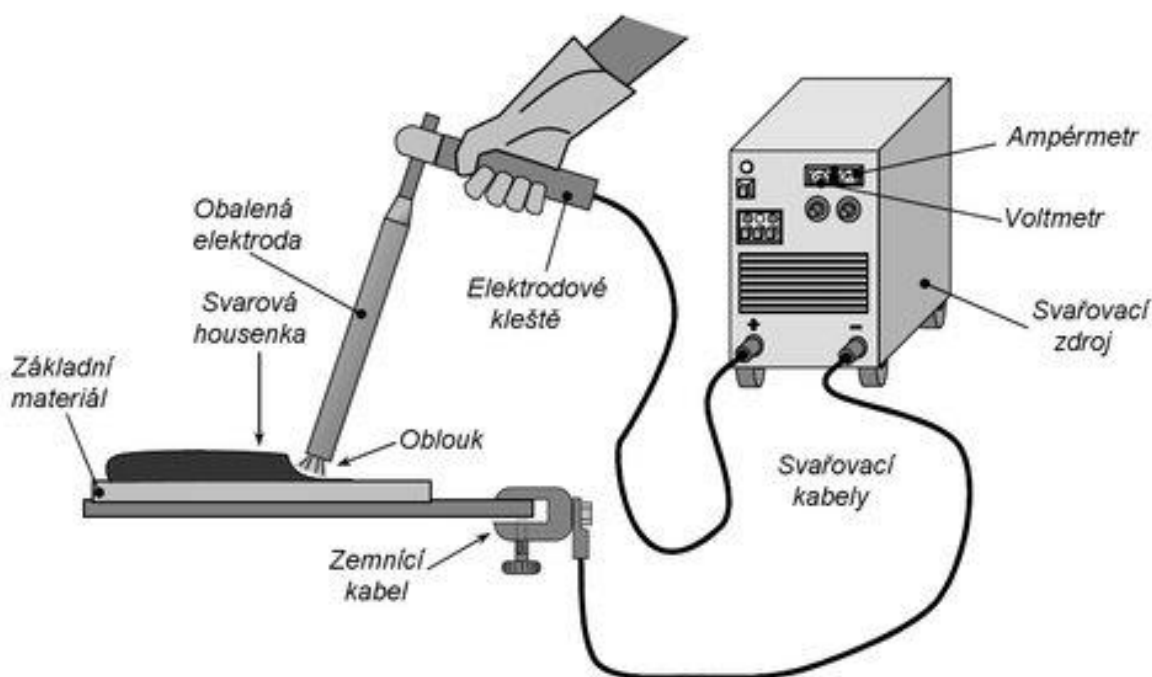


Jádro elektrody tvoří drát o průměru 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; a 6,0 mm. Obal má funkci plynotvornou, která zajišťuje ochrannou atmosféru z kouře a plynů, vznikajících při spalování obalu. Tato ochranná atmosféra zabraňuje přístupu kyslíku a dusíku ke svarové lázni. Funkce metalurgická způsobuje čištění svarového kovu. Další funkce, ionizační, zlepšuje stálost hoření oblouku.

Bazický obal je tvořen převážně fluoritem, vápencem a oxidem křemičitým. Elektrody jsou napájeny stejnosměrným proudem a připojené k anodě. Výjimkou jsou obaly na bázi zirkonu, zde je používán stejnosměrný proud.

Rutilový obal obsahuje především titanové rudy (rutil nebo ilmenit), oxid křemičitý, feromangan a vápenec. Elektroda je zde napájena buď střídavým, nebo stejnosměrným proudem a je připojena k zápornému pólu. Nedoporučuje se k svařu tlustých plechů, protože závar je velmi malý.

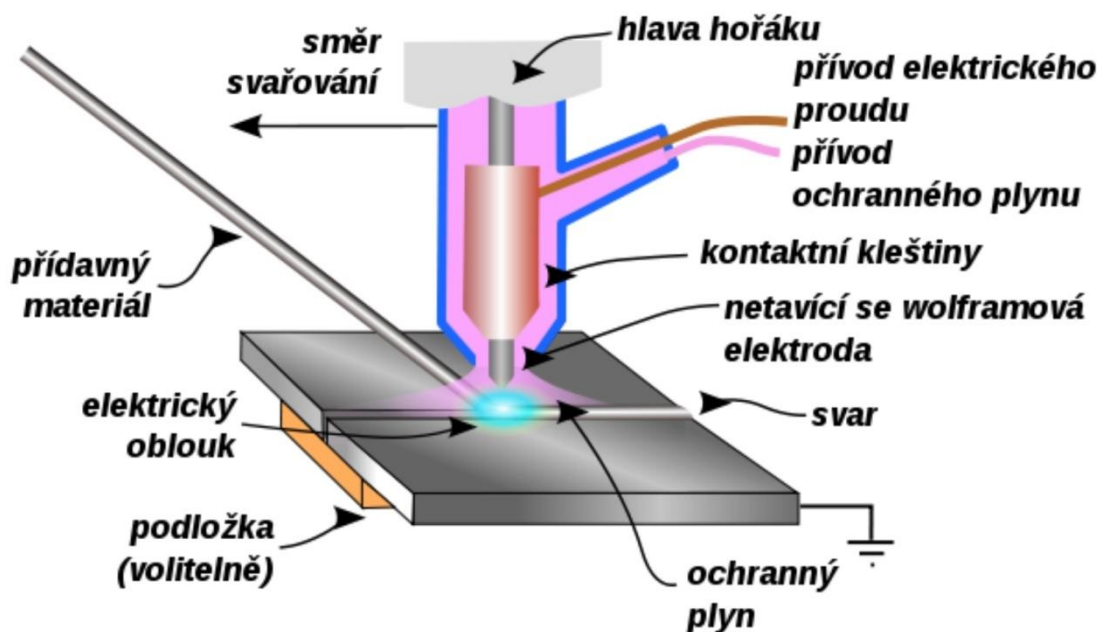
Kyselý obal se skládá z magnetitu, oxidu křemičitého feromanganu a vápence. Elektrody jsou připojeny ke katodě a napájí se střídavým nebo stejnosměrným proudem. Svarový kov má nižší pevnost, ale vyšší houževnatost. [5]



Obrázek 12 - Schéma svařování ruční obalenou elektrodou [4]

3.2.-2 Svařování netavící se elektrodou v atmosféře interního plynu – TIG

V této metodě hoří oblouk mezi netavící elektrodou a základním materiálem. Před okolním vzduchem chrání elektrodu a tavnou lázeň netečný plyn o vysoké čistotě. Je zde použito helium nebo argon a jejich směsi. Je možno svařovat s přídavným materiálem ve formě drátu. Svařuje se elektrodou napájenou střídavým nebo stejnosměrným proudem, záleží na svářeném materiálu. Pro měkké kovy jako je hliník, hořčík a jejich slitiny se používá proud střídavý. Stejnosměrným proudem se svařuje středně a vysokolegovaná ocel, měď, nikl, zirkon a další. Lze svařovat různé materiály, například ocel s mědí.



Obrázek 13 - Schéma svařování netavící se elektrodou v atmosféře interního plynu – TIG [6]

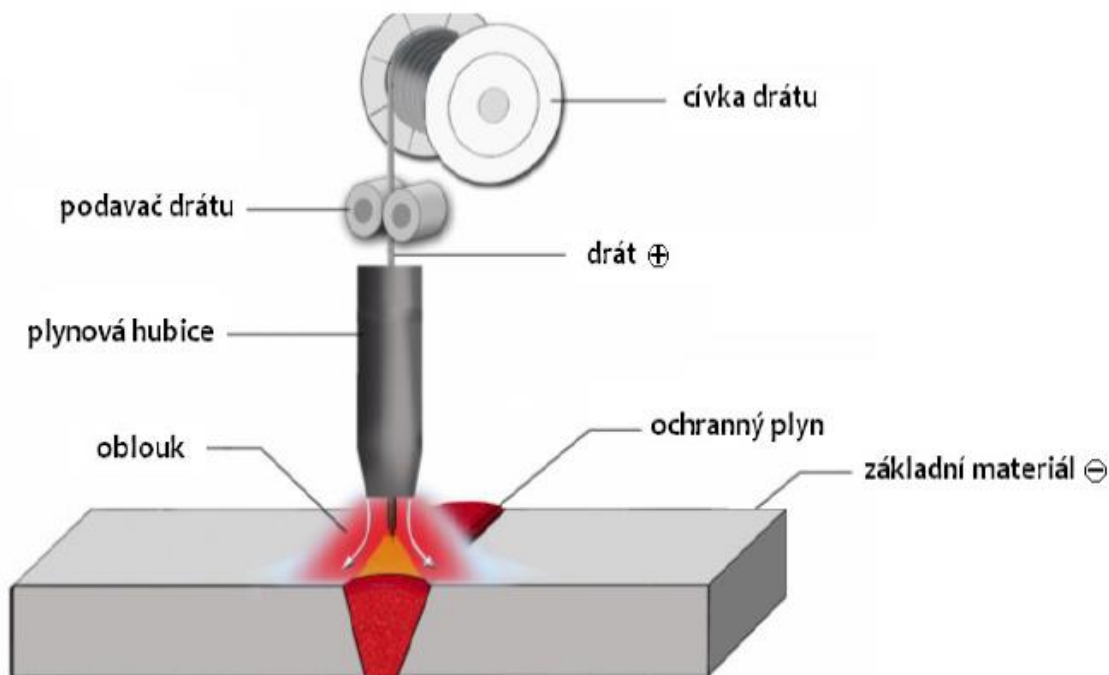
Při svařování stejnosměrným proudem je elektroda připojená na záporný pól zdroje a svařovaný materiál na kladný. Teplo v oblouku se rozděluje nerovnoměrně, třetina tepla připadá na elektrodu a dvě třetiny se přenáší do svařovaného materiálu. Díky tomu má svarová lázeň větší hloubku závaru. Velká hloubka závaru je dále způsobena dopadem elektronů, které svoji kinetickou energii přeměňují na tepelnou.

Při kladné polaritě na elektrodě má svařování střídavým proudem čistící účinky, toho se využívá při sváření hliníku a hořčíku. Na základním materiálu se vytvoří katodová skvrna. Tato skvrna se pohybuje na místa pokrytá oxidy, protože tato místa mají nižší emisní energii pro emisi elektronů. Po zasažení katodovou skvrnou se oxidy odpaří snadněji.

Svařování impulzním proudem. Velikost proudu se mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami. První hladinou základním proudem I_z a impulzním proudem I_p . Základní proud vytváří pouze ionizaci v oblasti oblouku. Jestliže doba působení základního proudu dvojnásobně přesáhne dobu impulzního proudu, dochází k ztuhnutí svarové lázně. Impulzivní proud má za úkol natavení svarové lázně a přídavného materiálu. Velikost svarové lázně závisí na délce trvání impulsu proudu. [5]

3.2.-3 Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu metodou MIG/MAG

Metoda MIG/MAG je založena na hoření elektrického oblouku mezi tavící se elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře. Ochranná atmosféra je směs interního a aktivního plynu. Jako tavná elektroda se používá drát navinutý na cívce. Pro co nejmenší namáhání drátu proudem je napájení zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku. Drát je podáván kladkami umístěnými v podavači o hmotnosti až 15 kg.



Obrázek 14 - Schéma svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou [7]

U metody MEG je vysoká proudová hustota a dosahuje hodnot až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Velikost proudu při malých průřezích drátu je od 30 A až po 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Teplota tavné lázně je 1600 a 2100 °C v závislosti na technologii, chemickém složení a materiálu.

V kapkách tavící se elektrody a v roztaveném svárovém kovu vznikají metalurgické reakce, které ovlivňují tvar oblouku, povrch svárové housenky a vnitřní čistotu svaru. Vzniklé kapky kovu jsou obohaceny kyslíkem při přechodu do tavné lázně a dosahují vysoké teploty, jelikož oxidační reakce jsou exotermické. Reakce uvolňují teplo. Teplo je vedeno difúzí do okolního materiálu, to má za výsledek hlubší a oválnější svárovou lázeň. [8]

3.3 Řezání elektrickým obloukem

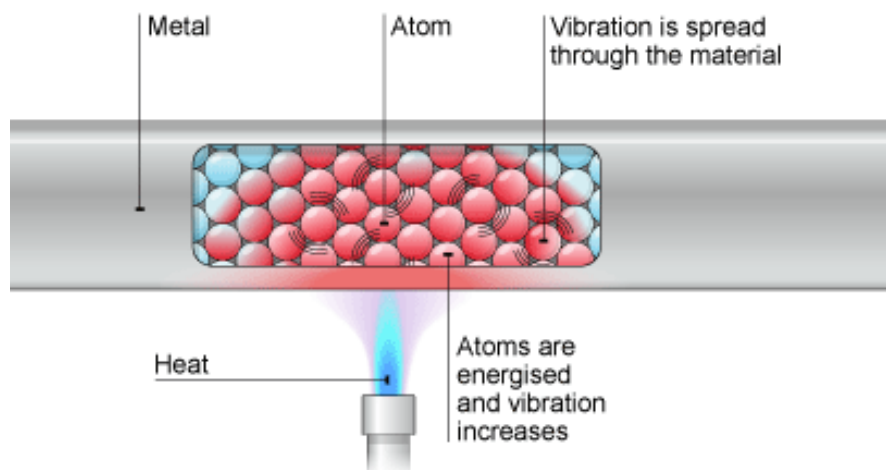
Řezání elektrickým obloukem je založeno na stejném principu jako svařování elektrickým obloukem. Napájecí proud elektrody je asi o 33% vyšší než při sváření. Nevýhodou je, že řezané plochy nejsou po oddělení čisté. Také je nutné zmínit vyšší náklady, než u řezání jinými technologiemi. Další špatnou vlastností je nepřesnost řezu, proto se tato metoda využívá převážně k demontáži, na dělení šedé litiny a neželezných kovů převážně na smetišti. Elektrickým obloukem je možné řezat pod vodou. Používá se elektroda s epoxidovou obalovou vrstvou jako izolace.

4 PŘENOS TEPLA Z ELEKTRICKÉHO OBLOUKU DO BLÍZKÝCH PŘEDMĚTŮ

Tepelná energie se šíří třemi způsoby. Prvním způsobem je šíření tepla vedením (kondukcí), dále prouděním (konvekci). U těchto dvou šíření zprostředkuje přenos energie hmotné prostředí. Třetí způsob je zářením neboli sáláním (radiací). Zde tepelnou energii přenáší elektromagnetické vlny šířící se i ve vakuu. [11]

4.1 Šíření tepla vedením

Fyzikální tělesa se skládají z částic, tyto částice nejsou v klidu a neustále se pohybují. Čím je vyšší teplota tělesa, tím intenzivnější pohyb částice vykonávají. U pevných těles jsou částice v silovém poli nejbližších částic a vychýlení jedné má za následek vychýlení vedlejší částice. Má-li těleso ve všech svých částech rozdílnou teplotu, vyrovnává se kinetická energie částic. To znamená, že teplejší části tělesa s větší energií částic se ochlazují a chladnější části s menší energií se naopak ohřívají. Tato výměna se děje tak dlouho, dokud nenastane ustálený stav. V tomto stavu má těleso po celém objemu stejnou a časově stálou teplotu, nazýváme přenos tepla neustáleným vedením. Jestliže je v tělese časově stálý teplotní spád, mluvíme o ustáleném vedení tepla. Dva konce tělesa vložíme do prostředí s rozdílnými teplotami a těleso přenáší energii z teplejšího prostředí do chladnějšího. [11]



Obrázek 15 - Šíření tepla vedením [10]

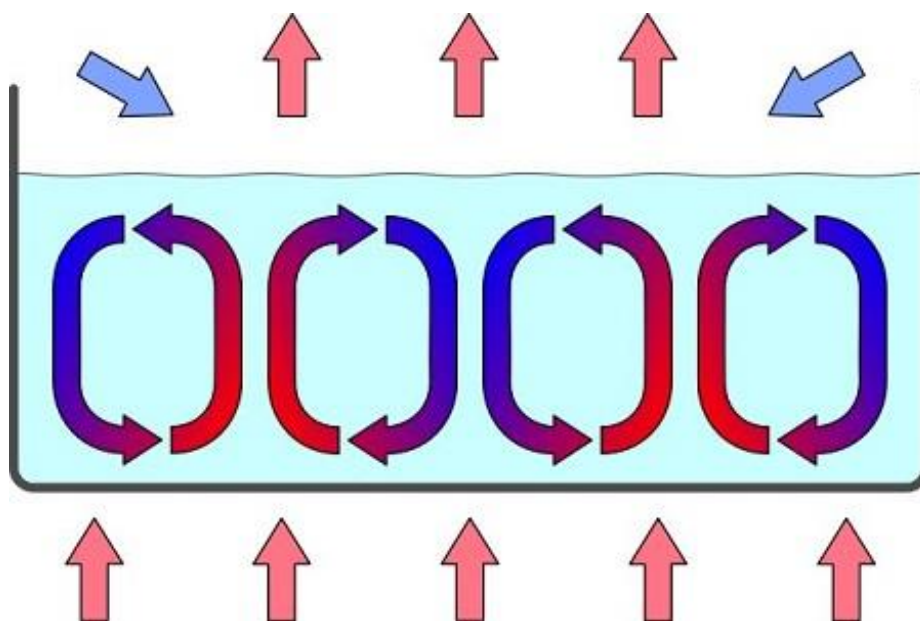
Tělesem o šířce δ , ploše S a s rozdílnými teplotami t_1 a t_2 prostupuje teplo Q . Teploty se vyrovnají za čas τ a dojde k rovnovážnému stavu. Teplo Q je přímo úměrné velikosti plochy S , teplotnímu rozdílu $(t_1 - t_2)$ a časové době τ a nepřímo úměrné tloušťce desky δ , platí tedy:

$$Q = \lambda \tau S \frac{(t_1 - t_2)}{\delta} \quad 4.1.1$$

„Tepelná vodivost λ udává číselně množství tepla, které projde za jednotku doby krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl 1 °C, jsou-li ostatní stěny krychle dokonale izolovány.“ [11]

4.2 Šíření tepla prouděním

Zahříváme-li kapalinu nebo plyn z dolu, vzniká proudění, protože dolní části se při zahřátí roztahují, sníží se jejich hustota, následkem snížení hustoty stoupají vzhůru a přinášejí do horních, chladnějších míst teplo. Chladnější, hustší části naopak klesají k zdroji tepla, kde se ohřívají. V tomto případě se teplo přenáší nejenom vedením, ale také prouděním neboli konvekcí tepla. Proudění vzniklé pouze rozdílem hustot nazýváme prouděním volným, nebo také přirozeným. Proudění vzniklé vnějšími vlivy nezávisle na transportu tepelné energie nazýváme proudění nucené. To se využívá v praxi pro zvýšení přenosu tepla prouděním. [11]

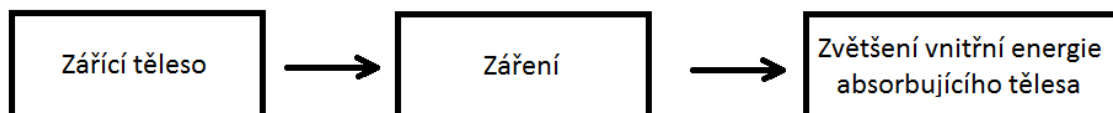
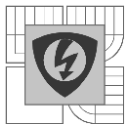


Obrázek 16 - Šíření tepla prouděním [12]

4.3 Šíření tepla sáláním

U tepelného záření neboli sálání se přenáší tepelná energie z tělesa na těleso, i když v prostoru mezi tělesy není hmota. Přenos tepla zářením probíhá, i když v prostředí mezi tělesy je teplota vyšší nebo nižší, než je teplota těles.

Sálání je proces, při kterém látka emituje do prostoru energii ve formě elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření můžeme rozlišit na záření rentgenové, ultrafialové, světelné, infračervené a elektromagnetické vlny. V případě šíření tepla je nejdůležitější záření infračervené. Vznik tepelného záření z tepelné energie nazýváme slovem emise. Jestliže dopadne toto infračervené záření na jiné těleso je pohlceno a mění se zároveň v energii tepelnou. Tuto pohlcenou energii těleso může následně opět vyzařovat. Část záření tělesem prochází a část se od tělesa odrazí. Odražená energie a energie, která tělesem prostoupí může být pohlcena jinými tělesy v okolí. Značně záleží na materiálu, povrchové úpravě tělesa a jeho hmotnosti. Pohlcené záření má za důsledek nárůst vnitřní energie tělesa, to nazýváme absorpcí.



Obrázek 17 - Sdílení tepla sáláním

Zářivý výkon dopadající na těleso:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_r + \dot{E}_a + \dot{E}_p \quad [\text{W}] \quad 4.3.1$$

Část \dot{E}_r se může od tělesa odrazit, část \dot{E}_a se může v tělese pohltit a část \dot{E}_p může tělesem prostoupit. Z tohoto vztahu plynou poměrné bezrozměrné veličiny:

$$r = \frac{\dot{E}_r}{\dot{E}_d}, a = \frac{\dot{E}_a}{\dot{E}_d}, p = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_d} \quad 4.3.2$$

pomocí poměrných veličin lze definovat modely těles z hlediska jejich chování při teplotním záření:

$r = 1$	těleso bílé (dokonalé zrcadlo),
$a = 1$	těleso černé,
$p = 1$	těleso průteplivé, diatermní,
$a + r = 1$	těleso šedé.

Planckův vyzařovací zákon – molekuly nevyzařují energii spojitě, ale vyzařování i pohlcování zářivé energie se děje jen po celistvých “kvantech” energie o velikosti:

$$e = h \cdot f = h \cdot \frac{v_0}{\lambda} \quad [\text{J}] \quad 4.3.3$$

kde: $h = 6,624 \cdot 10^{-34} [\text{Js}]$ – Planckova kvantová konstanta,

v_0 – rychlost světla ve vakuu $[\text{ms}^{-1}]$,

λ – vlnová délka $[\text{m}]$,

f – frekvence $[\text{s}^{-1}]$.



Stefan-Boltzmannův zákon – zákon pro emisivitu absolutně černého tělesa

Pro matematický vztah pro výpočet množství energie, které těleso vysílá za časovou jednotku, platí:

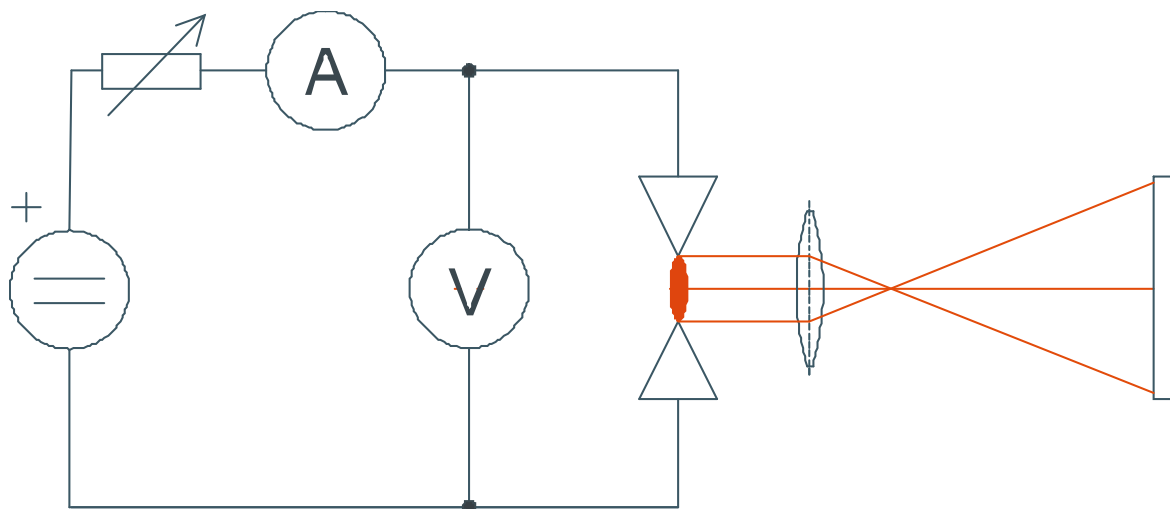
$$E = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad 4.3.4$$

kde: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je tzv. Stefanova-Boltzmannova konstanta a ε označuje emisivitu předmětu. Emisivita předmětu závisí na materiálu tělesa. Jestliže $\varepsilon = 1$, hovoříme o absolutně černém tělese. [11]

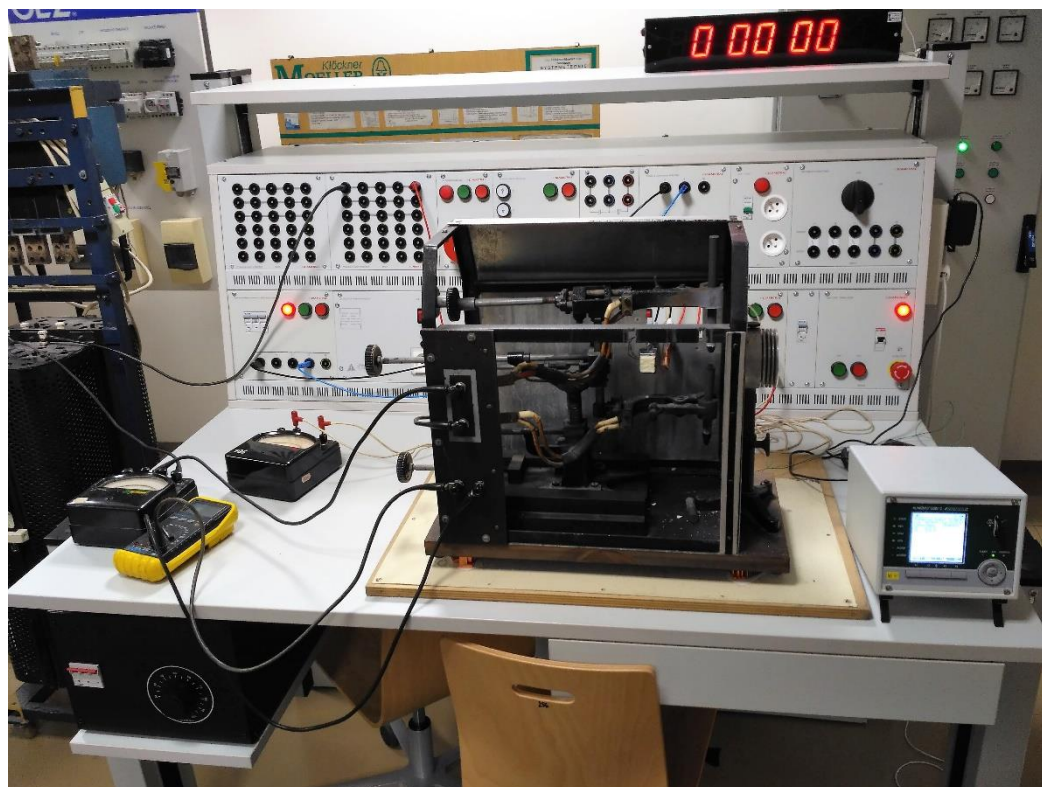
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PŘENOSU TEPLA Z ELEKTRICKÉHO OBLOUKU DO BLÍZKÉHO PŘEDMĚTU

5.1 Laboratorní přípravek pro generaci elektrického oblouku

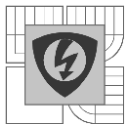
Pracoviště pro generaci stejnosměrného oblouku bylo zapojeno podle (Obrázek 18). Stejnosměrný zdroj tvořilo dynamo. Jako stabilizační odpor, sloužící pro stabilizaci hoření oblouku, byl použit reostat. Ampérmetr sloužil pro měření proudu elektrickým obloukem. Voltmetr měřil napětí na elektrodách oblouku. Obraz oblouku hořícím mezi elektrodami byl přes čočku promítán na stínítko.



Obrázek 18 - Schéma zapojení přípravku pro generaci elektrického oblouku [9]



Obrázek 19 - Zapojení přípravku pro generaci elektrického oblouku



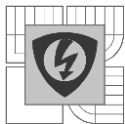
5.2 seznam přístrojů použitých pro měření

5.2.-1 Měřicí ústředna ALMEMO® 5690-2

Měřicí ústředna ALMEMO 5690-2 je modulární systém, u kterého lze konfiguraci zvolit podle požadavků uživatele. Maximální počet připojených snímačů je 99 a možnost využití 100 měřicích kanálů s volbou až 70 měřicích rozsahů.

Tabulka 1 - Seznam fyzikálních veličin, které měřicí jednotka ALMEMO umožňuje měřit [14]

Typ senzoru	Měřicí rozsah	Rozlišení	Přesnost linearizace
Odporově závislé teplotní senzory:			
Pt100/Pt1000-1 4-vodičový	(-200 ~ +850) °C	0,1 K	± 0,05 K ± 0,05 %
Pt100/Pt1000-2 4-vodičový	(-200 ~ +400) °C	0,01 K	± 0,05 K
Pt100-3 4-vodičový	(-8 ~ +65) °C	0,001 K	± 0,002 K
Ni100/Ni1000 4-vodičový	(-60 ~ +240) °C	0,1 K	± 0,05 K
Ntc Typ N	(-50 ~ +125) °C	0,01 K	± 0,05 K
Termočlánky:			
NiCr-Ni (K)	(-200 ~ +1370) °C	0,1 K	± 0,05 K ± 0,05 %
NiCroSil-Nisil (N)	(-200 ~ +1300) °C	0,1 K	± 0,05 K ± 0,05 %
Fe-CuNi (L)	(-200 ~ +900) °C	0,1 K	± 0,05 K ± 0,05 %
PtRh 10-Pt (S)	(0 ~ +1760) °C	0,1 K	± 0,3 K
Au Fe-Cr	(-270 ~ +60) °C	0,1 K	± 0,1 K
Elektrické signály:			
Milivolty DC	(-10 ~ +55) mV	1 μV	-
Milivolty 1 DC	(-26 ~ +26) mV	1 μV	-
Milivolty 2 DC	(-260 ~ +260) mV	0,01 mV	-
Volt DC	(-2,6 ~ +2,6) V	0,1 mV	-
Volt DC	(-26 ~ +26) V	0,1 mV	-
Miliampéry DC	(-32 ~ +32) mA	1 μA	-
Ohmy 1	(0 ~ +500) Ω	0,01 Ω	-
Ohmy 2	(0 ~ +5000) Ω	0,1 Ω	-
Frekvence	(0 ~ 15000) Hz	1 Hz	-
Kapacitní snímače vlhkosti:			
Relativní vlhkost	(-5 ~ 98) %H	0,1%	-
Rosný bod	(-25 ~ 100) °C	0,1 K	± 0,2 K
Rotování lopatek	(0,4 ~ 40) m/s	0,01 m/s	± 0,2 m/s ± 0,2 %
Vodní turbína	(0,5 ~ 40) m/s	0,1 m/s	± 0,1 m/s ± 0,2 %
Chemické sondy:			
Konduktivní sonda	(0 ~ 20) mS	0,001 mS	± 0,2 %
CO ₂ sonda	(0 ~ 25) %	0,01%	± 0,2 %
Nasycení O ₂	(0 ~ 260) %	1%	-
Koncentrace O ₂	(0 ~ 40) mg/l	0,1 mg/l	± 0,2 mg/l



Měřicí ústředna ALMEMO 5690-2 dokáže měřit velké množství fyzikálních veličin. Tyto veličiny jsou zobrazeny v (*Tabulka 1*).

Možnost propojení s PC optickým kabelem, pomocí sady Bluetooth, modemem nebo radiově pomocí ethernetu a internetu. Druhou možností je ukládat data na SD kartu ve formátu FAT16.

Dále disponuje grafickým displejem o rozlišení 128 x 128 bodů. Tento displej je podsvícený a přehledný. Ovládá se devíti tlačítky a je zde devět signalizačních LED diod.

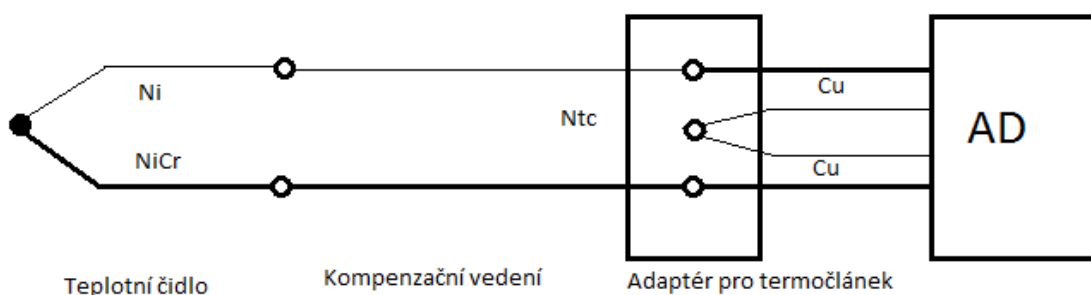
Napájí se přes síťový adaptér ZB1212NA3, 90 – 250 V / 12 DC, 2 A. Výhodou je zde baterie s kapacitou 1600 mAh, která nám dovoluje přístroj používat i v místech bez přívodu elektrické energie. [14]

5.2.1.1 Termočlánek

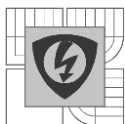
Termodynamické články se skládají ze dvou stočených drátů z různých kovů nebo slitin. Dráty mohou být eventuálně také svařeny, nebo spájeny. Termoelektrický účinek na styčnou plochu se používá k měření teploty. To způsobuje relativně malé termoelektrické napětí, které závisí na teplotním rozdílu na svorkách dvou kompenzačních vedení viz (*Tabulka 2*). [14]

Tabulka 2 - Závislost termoelektrického napětí na teplotě naměřené termočlánekem

Teplota	NiCr-Ni (K)	NiSi (N)	Fe-CuNi (J)	Cu-CuNi (T)
[°C]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]
-200	-5,891	-3,990	-7,890	-5,603
-100	-3,554	-2,407	-4,633	-3,379
0	0,000	0,000	0,000	0,000
100	4,096	2,774	5,269	4,279
200	8,138	5,913	10,779	4,288
300	12,209	9,341	16,327	14,862



Obrázek 20 - Schéma termočlánu [14]



5.2.-2 Váha RADWAG AS 60/220.R2

Tato váha je vybavena podsvíceným LCD displejem, který je doplněn o textovou linku pro zadávání a čtení názvů produktů nebo přihlašování uživatelů. Přesnost vážení zajišťuje automatická vnitřní kalibrace, která je závislá na teplotních a tlakových změnách. Rozsah měření váhy je od 1mg do 60gs odečitatelností 0,01 mg / 0,1 mg. Rozměry misky jsou průměr $d = 70$ mm. Přibližná doba stabilizace je 6 s. Navážená data můžeme přenášet přes rozhraní RS 232, USB-A, USB-B nebo WiFi. [13]



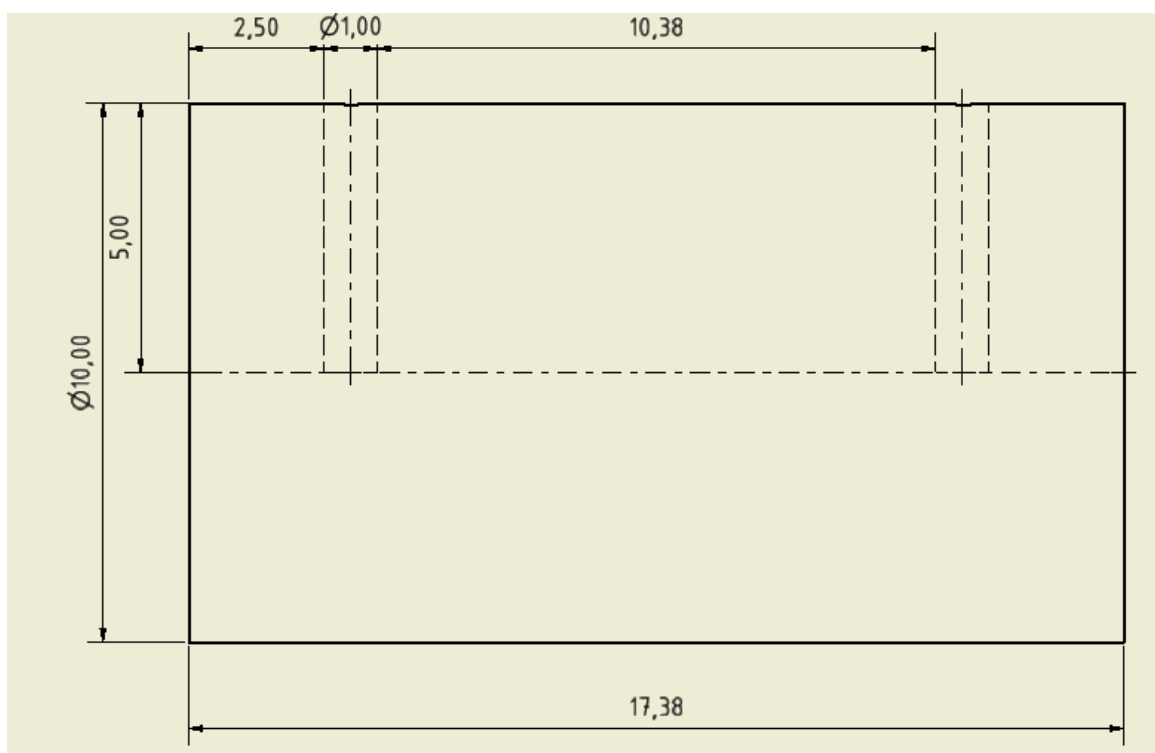
Obrázek 21 - Váha RADWAG AS 60/220.R2 [13]

Tabulka 3 - Seznam použitých přístrojů

Přístroj	Výrobce	Typ	TP	Výrobní číslo	Poznámka
Měřicí ústředna	AHLBORN	Almemo® 5690-2	-	A12110214	-
Váha	RADWAG	AS 60/220.R2	-	479027	Rozsah: 0 - 60 g
					Odečitatelnost = 0,01/0,1 mg
Multimetr	MASTECH	MY - 68	-	-	-
Ampérmetr	METRA	-	1,5	9044161	0 - 65 A
Multimetr	AMPROBE	Hexagon 340A	-	-	Přesnost: +/- (0,08 + 2)
Multimetr	AMPROBE	BEHA AM-510-EUR	-	-	+/- 0,5 %
Voltmetr	METRA	-	-	4137707	0 - 130 V
Stojan		Wheel manual test stand	-	4212046864	-
Stopky	Elektročas	DSS57	-	-	-
Posuvné měřítko	Tigre	-	-	-	digitální
Brusný papír	Carborundum	-	-	-	150/320
Zdroj na chlazení	ZPT Brno	RZ 12A	-	-	-
Akrylové barvy	HB-LAK s.r.o	-	-	-	Černá, červená, bílá, zelená, modrá, stříbrná, hnědá

5.3 Volba vhodné vsázky

Vsázka byla zastoupena vzorky mědi. Použita byla měděná kulatina o průměru $d = 10$ mm. Z této kulatiny bylo na soustruhu vyhotoveno 11 shodných vzorků. Do každého vzorku byly stojanovou vrtačkou vyvrtány dvě díry o průměru $d = 1$ mm pro uložení termočlánků na snímání teploty.



Obrázek 22 – Schéma vzorku mědi připravený k měření

Následně proběhla u všech vzorků povrchová úprava. Vzorky byly odmaštěny technickým lihem a upraveny dle následující tabulky:

Tabulka 4 - Povrchová úprava vzorků

Číslo vzorku	Povrchová úprava
1	černý nátěr
2	červený nátěr
3	modrý nátěr
4	stříbrný nátěr
5	vyleštěný
6	soustružený
7	opracován brusným papírem o zrnitosti 320
8	opracován brusným papírem o zrnitosti 150
9	zelený nátěr
10	bílý nátěr
11	hnědý nátěr



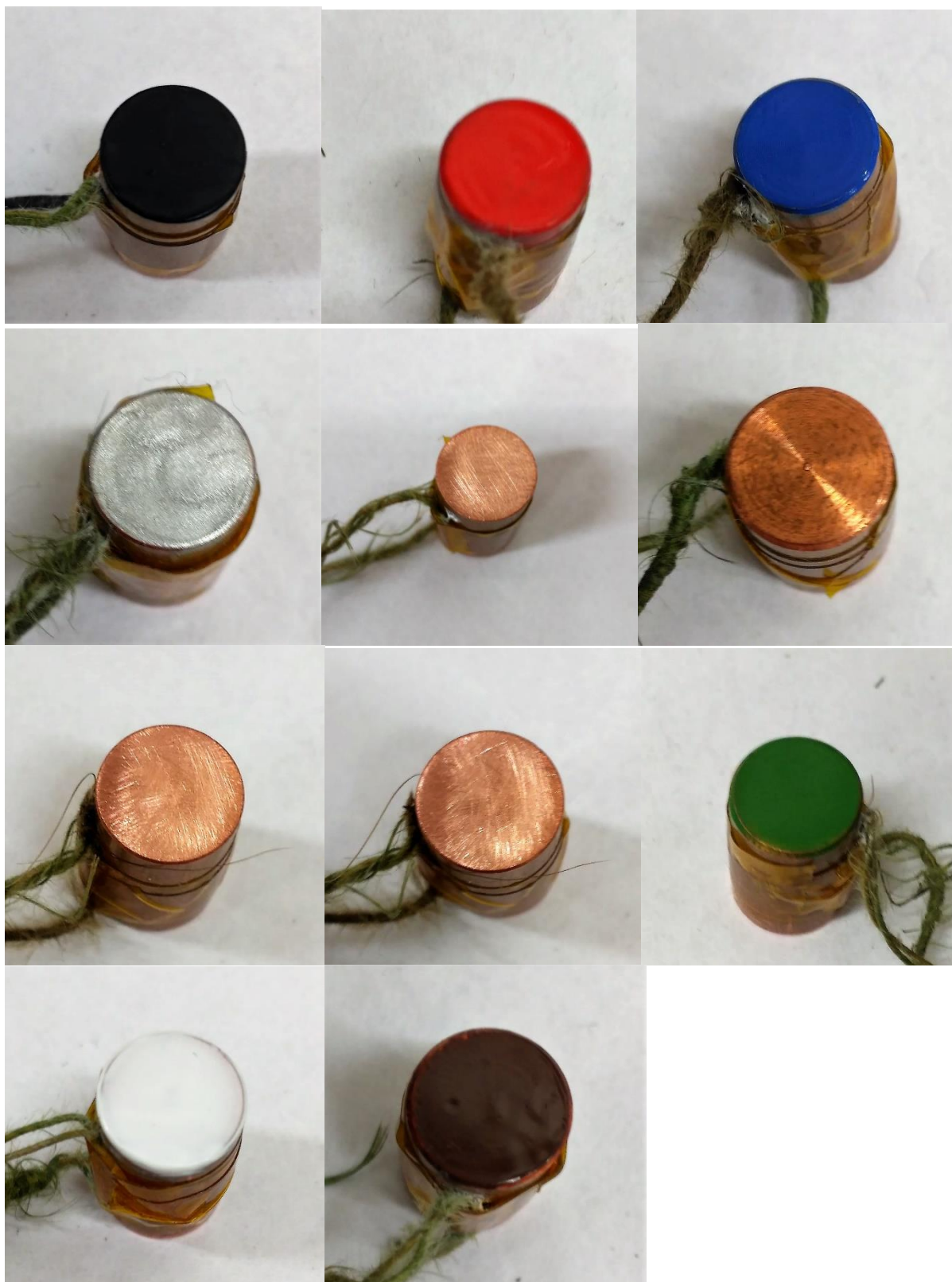
Brusné papíry byly od české firmy CARBORUNDUM Electrite. Zrnitost popisuje velikost použitých brusných zrn v matrici brusného nástroje. Čím je hodnota zrnitosti větší, tím jsou zrna v brusném papíru jemnější. Výsledkem je rozdílná hrubost povrchu vzorku. Odlišný povrch vzorku má za následek jiné vlastnosti při přijímání energie. Hladší vzorek odráží více energie. Použité barvy byly od firmy HB-LAK s.r.o. Tyto barvy jsou akrylátové.

Po zaschnutí barev byl každý jednotlivý vzorek zvážen na váze RADWAG AS 60/220.R2. Při vážení byl vzorek uzavřen v ochranné komoře pro eliminaci vnějších vlivů. Jednotlivé neměřené hmotnosti jsou uvedeny v (*Tabulka 5*).

Dalším krokem bylo upevnit termočlánky do jedenácti vzorků. Termočlánky byly zvoleny NiCr (Typ K). Termočlánky byly potřeny teplovodivou silikonovou pastou DOW CORNING 340. Tato vazelína zde byla z důvodu, snížení tepelného spádu mezi vzorkem a termočlánkem. Následně byly termočlánky usazeny do předem vyvrtaných otvorů. Dalším krokem bylo zajistit pozici termočlánků v otvorech. Toho bylo docíleno Kaptonovou lepicí páskou.

Tabulka 5 - Tabulka hmotnosti vzorků

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m [g]	12,047	11,901	11,951	11,944	11,986	11,929	11,951	11,988	12,027	12,054	12,048



Obrázek 23 - Vzorčky v konečné podobě seřazeny od vzorku č.1 po vzorek č. 11

5.4 Izolant

Dále bylo nutno vybrat správný izolant, který byl použit k izolaci vsázky, aby bylo měření co nejefektivnější a tepelná energie neunikala z vsázky do okolí a do laboratorního přípravku. Izolant byl vybírán podle maximální teploty, aby se nezměnily jeho izolační vlastnosti po dobu měření. Dále bylo dbáno na tepelnou vodivost, která nám určuje schopnost daného izolantu vést teplo. Představuje rychlost, jakou se teplo šíří ze zahřáté části látky do chladnější. Účelem bylo ohřát vsázku po celém objemu na stejnou teplotu. Třetím aspektem byla tepelná kapacita, která vyjadřuje množství tepla, jakým se jednotkový objem, případně jednotková hmotnost izolantu ohřeje o jednotkový teplotní rozdíl.

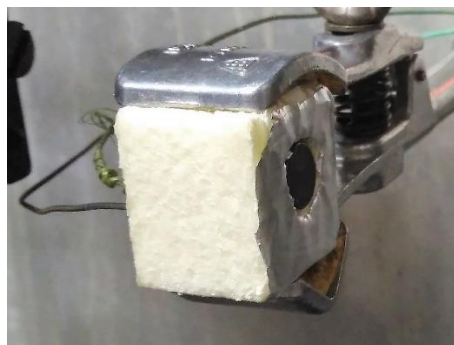
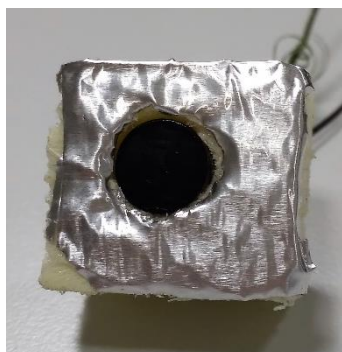
Tabulka 6 - Vlastnosti plastu při teplotě 20 °C [15] [16] [17]

Plast	Krátkodobá maximální teplota	Tepelná vodivost	Tepelná kapacita	Hustota
[-]	[°C]	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	[g cm ⁻³]
PTFE	260	0,23	1,04	2,20
PA6	220	0,33	1,60	1,14
POM	170	0,22	1,46	1,41
PVC-U	66	0,15	0,96	1,40
PVC-C	102	0,15	0,96	1,55
PP	90	0,16	1,88	0,92
PA66	180	0,28	1,65	1,15
PET	180	0,24	1,00	1,37
PMMA	100	0,19	1,38	1,19
EPS	70	0,17	1,34	0,30

V tabulce jsou vypsány plasty a jejich vlastnosti, díky nízké tepelné vodivosti, hustotě a tepelné kapacitě byl vybrán EPS neboli extrudovaný polystyren. Vybraný plast byl dále upraven do tvaru krychle s vykrouženým otvorem pro vzorek o průměru 10 mm.

Na přední stranu izolantu, tzn. na plochu směřující k oblouku, byla nalepena samolepící hliníková páska. Ta zde byla použita za účelem zvýšení odolnosti izolantu vůči vysoké teplotě oblouku.

Dále bylo za potřeby vzorek umístit do vhodné polohy od elektrického oblouku, tak aby mohl přijímat dostatečné množství tepelné energie. Toto nám zajišťoval laboratorní stojan Wheel manual test stand. Ten byl nastaven do požadované výšky a umístěn na danou polohu.



Obrázek 24 - Vzorek umístěn do izolace

5.5 Postup při přípravě přípravku na generaci elektrického oblouku

Na přípravku pro generaci elektrického oblouku byl generován stejnosměrný elektrický oblouk. Proto bylo důležité přivést stejnosměrné elektrické napětí k pracovnímu stolu, to nám bylo zajištěno dynamem. Toto dynamo se nenacházelo přímo v laboratoři elektrických přístrojů, ale v jiné části budovy, a to z důvodu vysokého hluku. Dynamo bylo ovládáno dálkově z laboratoře elektrických přístrojů. Byl zajištěn přívod elektrické energie do pracovního stolu.

Byla změřena velikost napětí v budícím obvodu. Napětí bylo měřeno na multimetru AMPROBE BEHA AM-510-EUR. Hodnota napětí byla $U = 29 \text{ V}$.

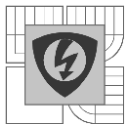
Do série v elektrickém obvodu byl zapojen stabilizační odpor. Tento odpor zde sloužil ke stabilizaci hoření elektrického oblouku. Dále byl do obvodu zapojen digitální multimetr AMPROBE Hexagon 340 A paralelně k elektrickému oblouku pro měření napětí na oblouku a ampérmetr METRA s rozsahem $0 - 65 \text{ A}$ v sérii k elektrickému oblouku pro měření proudu protékajícího elektrickým obloukem.

Napětí mezi dvěma elektrodami před zapálením elektrického oblouku bylo měřeno multimetrem AMPROBE Hexagon 340 A. Napětí bylo $U = 90,1 \text{ V}$.



Obrázek 25 - Detail uhlíkových elektrod před zapálením elektrického oblouku s připraveným vzorkem s izolací

Oblouk byl generován termickou metodou, to znamená, že dvě elektrody pod napětím přiblížíme, aby se navzájem dotýkaly. Tímto elektrickým obvodem protékal ionizační proud nakrátko. Tento proud byl měřen na analogovém ampérmetru METRA, $I = 6,7 \text{ A}$. Ve styku dvou elektrod vybavovalo teplo. Pomalým oddálením elektrod od sebe vznikl elektrický oblouk, který hořel ve vzduchu a párách odpařujících se elektrod. Po zapálení elektrického oblouku proud

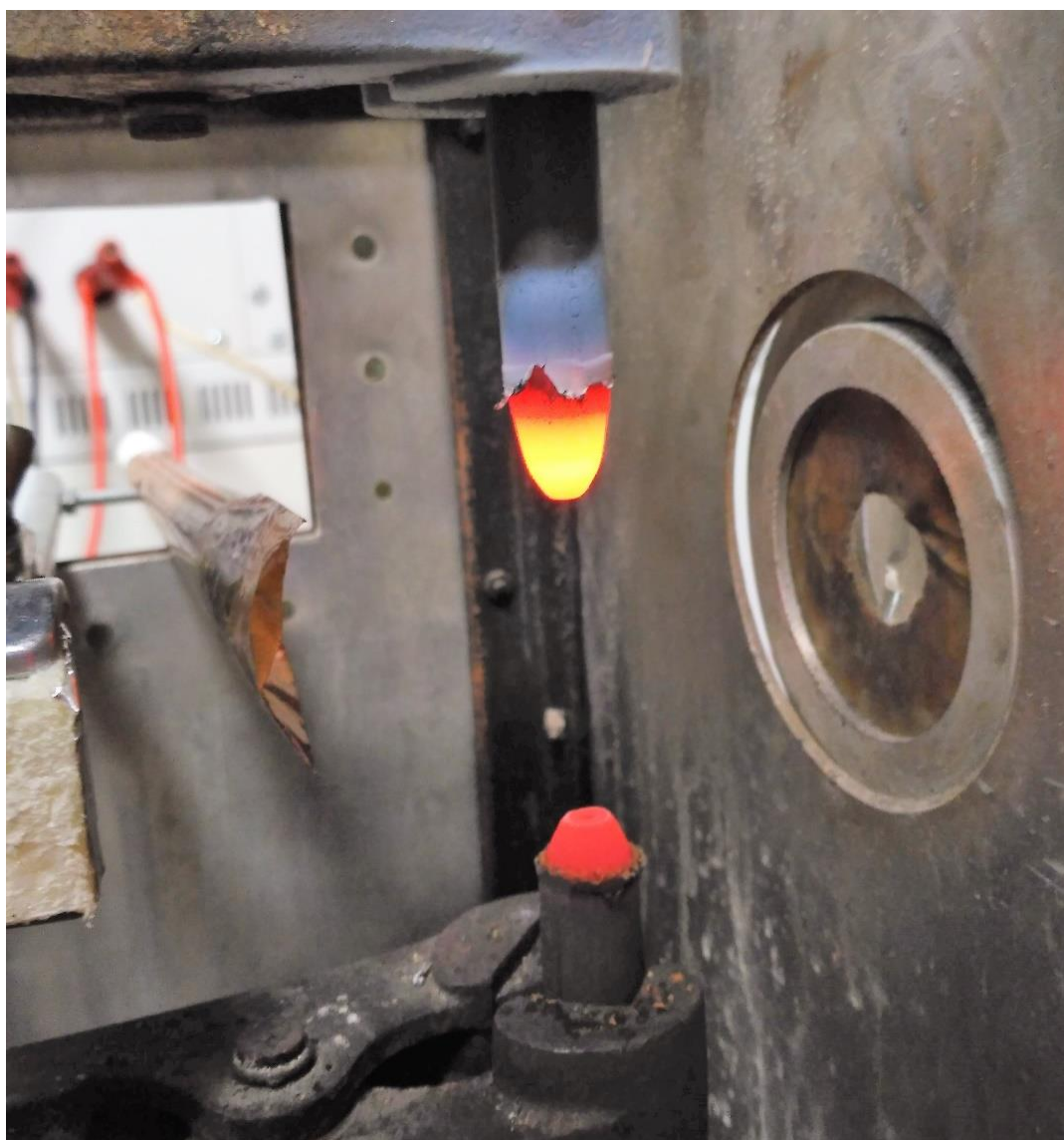


v elektrickém obvodu následně vzrostl na $I = 8,8$ A. Toto bylo způsobeno nárůstem vodivosti výbojového prostoru po zapálení elektrického oblouku.

Bylo nastaveno napětí na elektrickém oblouku. Toto napětí bylo drženo na konstantní hodnotě a to $U = 50$ V. Dále byla nastavena požadovaná velikost proudu obloukem pomocí stabilizačního reostatu. Hodnota proudu byla $I = 4$ A. Velmi důležité bylo tyto hodnoty držet stále na stejné velikosti, aby byl zajištěn konstantní výkon elektrického oblouku.

Postupným oddalováním elektrod vznikla větší plocha elektrického oblouku. Čím větší byla plocha oblouku, tím se oblouk více chladil a více energie odváděl do okolí. To znamenalo, že rostl odpor na oblouku. Jestli-že rostl odpor, tak pro udržení bylo nutno zvyšovat napětí. Pokud nebylo napětí zvýšeno, oblouk zhasl. Po zhasnutí elektrického oblouku bylo naměřeno zotavené napětí. Toto napětí bylo měřeno na multimetru AMPROBE Hexagon 340 A, $U = 92,8$ V.

Po zhasnutí elektrického oblouku byl vypnut výstup z dynama. Nyní byl obvod otestován a připraven k samotnému měření.



Obrázek 26 - Elektrody po zhasnutí oblouku s přídatnou izolací

5.6 Měření přenosu tepla z elektrického oblouku generovaném laboratorním přípravkem do vsázky

Termočlánky byly zapojeny do měřicí ústředny ALMEMO 5690-2, která měří termoelektrické napětí a následně provádí přepočet tohoto napětí na teplotu.

Vzorek i s izolací byl vložen do připraveného laboratorního. Stojan byl přesně nastaven do vzdálenosti $l = 80$ mm od elektrického oblouku. Také bylo důležité, aby byl vzorek ve výškové úrovni s elektrickým obloukem a plocha čela opatřeného úpravou rovnoběžně s osou hořícího oblouku. Jestli-že by se vzorek nacházel pod nebo nad elektrickým obloukem, vedlo by to k chybám měření, stejně tak úhel natočení vzorku by ovlivnil množství přeneseného tepla.

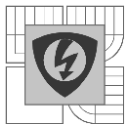


Obrázek 27 - Stojan s tepelnou izolací

Před začátkem měření byly změřeny hodnoty okolí přístrojem D4130 COMET. Teplota okolí před měřením testem $T = 22$ °C. Vlhkost vzduchu 29,2 %. Atmosférický tlak $p = 977,7$ hPa. Rosný bod 3,2 %.

Každý vzorek byl zahříván třemi různými velikostmi proudů při třech různých vzdálenostech od oblouku. Nejprve byl vystaven teplu vyzářeného z elektrického oblouku vzorek číslo 1. Před zapálením oblouku byla překontrolována vzdálenost $l = 80$ mm. Před zapálením oblouku byl vzorek od oblouku oddělen lesklou kovovou clonkou. Tato clonka se zde nacházela za účelem, aby bylo možno oblouk před samotným měřením nastavit na požadovaný výkon. Kdyby se zde clonka nenacházela, vzorek by byl ohříván ještě před započítáním měřeného časového intervalu a tento fakt by vnesl velkou nepřesnost do měření.

Když byl nastaven výkon na požadovanou hodnotu, ta byla v prvním případě $P = 200$ W, proud protékající obloukem byl $I = 4$ A, bylo zahájeno měření. Byla odstraněna izolační clonka a po dobu $t = 60$ s, s krokem 1 s, byla měřena teplota vzorku. Po uplynutí času byl oblouk uhašen a



naměřené hodnoty zaznamenány a uloženy. Po mírném vychlazení byl vzorek vyjmut ze stojanu. Vzorek a termočlánky byly postupně ochlazovány, zatím co probíhalo další měření.

Tento proces byl opakován pro všech jedenáct vzorků, přičemž před každým měřením byla přeměřena vzdálenost $l = 80$ mm, velikost proudu $I = 4$ A a velikost napětí $U = 50$ V.

Po změření všech jedenácti vzorků byla zkrácena vzdálenost vzorku od elektrického oblouku na $l = 70$ mm. Výkon oblouku byl ponechán konstantní. Proud $I = 4$ A a $U = 50$ V, tzn. $P = 200$ W. Znovu bylo měření provedeno pro všech jedenáct vzorků. Výkon byl udržován na konstantní hodnotě a vzdálenost byla $l = 70$ mm.

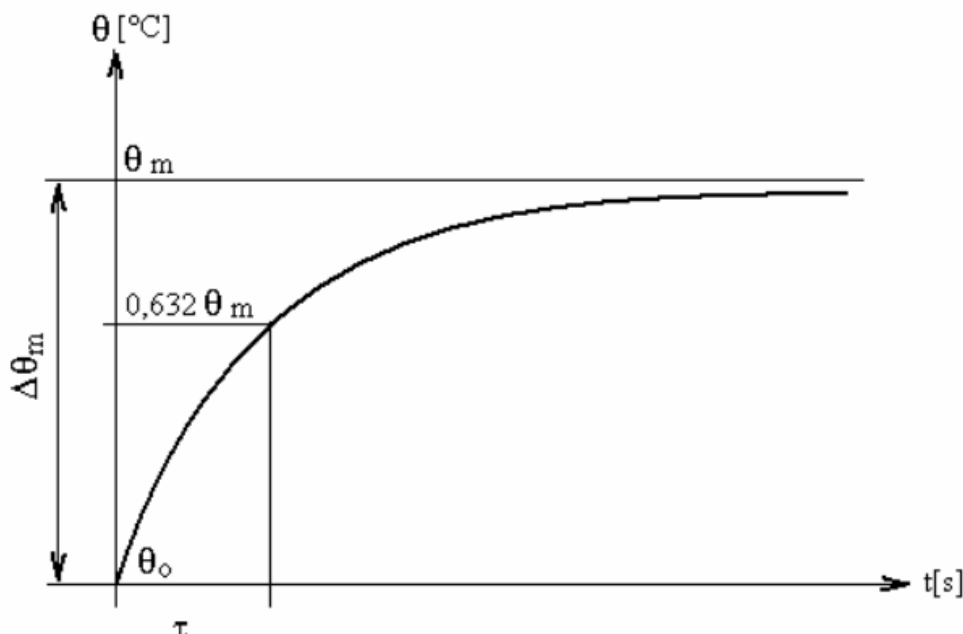
Při třetím měření byl ponechán opět výkon $P = 200$ W. Vzdálenost vzorku byla zkrácena na $l = 60$ mm. Následně bylo měření opakováno pro všech jedenáct vzorků. Při každé výměně vzorku byla vždy přeměřena vzdálenost a nastaven správný výkon.

U čtvrtého měření se nastavila vzdálenost vzorku od oblouku na $l = 80$ mm. Byl navýšen proud elektrickým obloukem na $I = 6$ A. Napětí ponecháno na $U = 50$ V. Byly změřeny všechny vzorky. Následně byl ponechán výkon na $P = 300$ W a zmenšena vzdálenost $l = 70$ mm. Nyní byly přeměřeny opět všechny vzorky. Při $P = 300$ W bylo provedeno ještě jedno měření se sníženou vzdáleností mezi obloukem a vzorkem na $l = 60$ mm.

Při dalším měření byl zvýšen proud na $I = 8$ A. Napětí bylo ponecháno na $U = 50$ V. To znamená výkon $P = 400$ W. Opět byla vzdálenost postupně snižována z $l = 80$ mm na $l = 70$ mm a poté na $l = 60$ mm. Při každé vzdálenosti byl překontrolován správný výkon a bylo proměřeno všech jedenáct vzorků.

5.7 Vyhodnocení měření

Na každém vzorku byly změřeny dvě hodnoty teplot, a to prvním a druhým termočlánkem. První termočlánek byl umístěn v první polovině vzorku, blíže k elektrickému oblouku, další byl umístěn na druhém konci vzorku. Tyto hodnoty byly zprůměrovány a následně přepočítány na oteplení.



Obrázek 28 - Teoretická oteplovací charakteristika [18]

5.7.-1 Výpočet tepla

Z naměřených hodnot bylo vypočítáno teplo Q pro každý vzorek zvlášť. Teplo bylo počítáno ze vztahu:

$$Q = \theta_{max} \cdot m \cdot c_m \quad 7.4.1$$

kde: θ_{max} [K] – oteplení oproti počáteční teplotě,

m [kg] – hmotnost vzorku,

c_m [J kg⁻¹ K⁻¹] – měrná tepelná kapacita mědi.

Příklad výpočtu pro černý vzorek při proudu $I = 4$ A a vzdálenosti $l = 60$ mm:

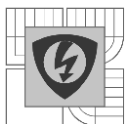
$$\theta_{max} = 6,3 \text{ [K]}$$

$$m = 0,012047 \text{ [kg]}$$

$$c_m = 383 \text{ [J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$$

$$Q = 6,3 \cdot 0,012047 \cdot 383$$

$$Q = 29,068 \text{ J}$$



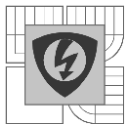
V tabulkách je uvedené teplo absorbované do jednotlivých vzorcích. Úprava plochy vzorků je v tabulce stručně uvedena, a to buď barvou nebo jinou metodou úpravy.

Tabulka 7 - Vypočítané absorbované teplo pro $l = 60 \text{ mm}$

l	[mm]	60		
I	[A]	4	6	8
Q [J]	černá	29,068	39,680	49,831
	červená	11,167	25,753	35,781
	modrá	16,707	25,175	29,981
	stříbrná	21,043	31,564	40,942
	leštěná	10,099	14,001	19,510
	soustružená	14,163	17,133	23,072
	brus. papír 320	16,936	20,826	23,115
	brus. papír 150	20,891	22,039	30,533
	zelená	19,577	28,329	33,857
	bílá	19,159	27,238	31,393
	hnědá	26,533	37,146	46,144

Tabulka 8 - Vypočítané absorbované teplo pro $l = 70 \text{ mm}$

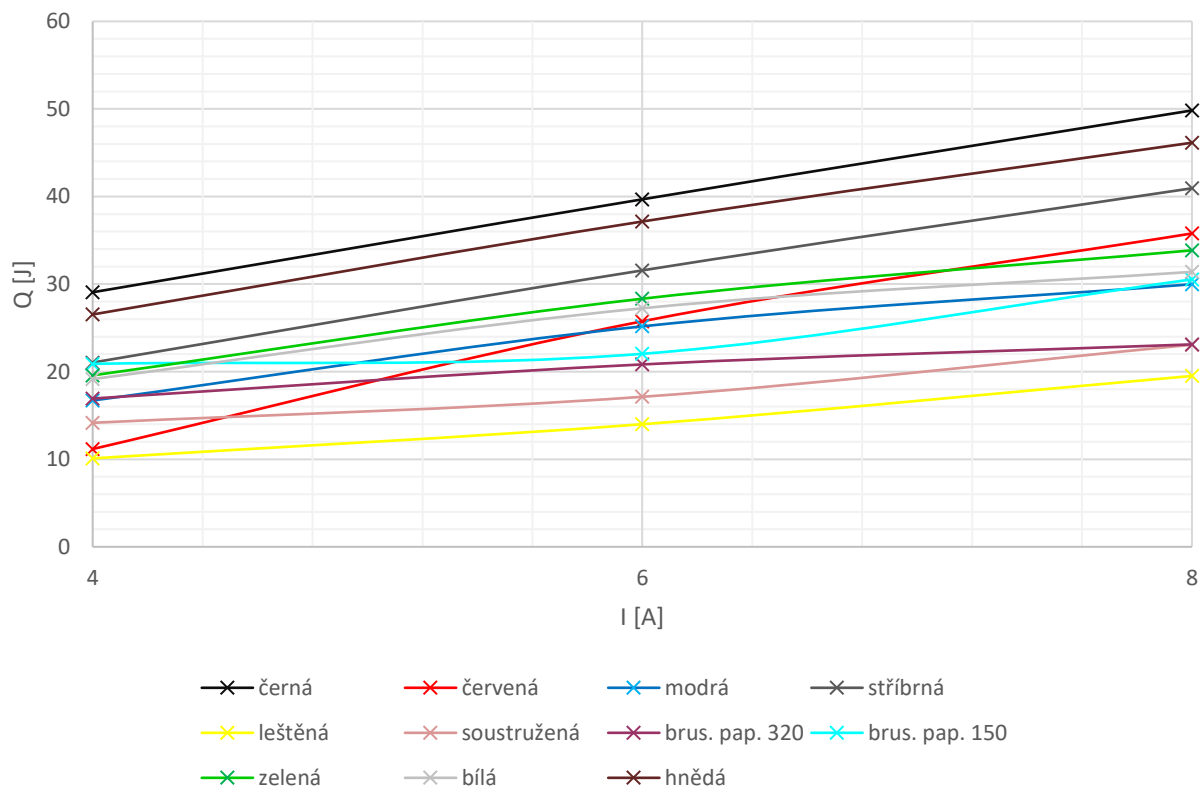
l	[mm]	70		
I	[A]	4	6	8
Q [J]	černá	18,687	30,452	45,909
	červená	10,256	18,460	24,158
	modrá	11,901	18,080	28,150
	stříbrná	14,639	25,389	35,453
	leštěná	5,509	13,313	17,215
	soustružená	7,767	13,935	20,788
	brus. papír 320	9,841	15,105	24,946
	brus. papír 150	10,331	17,218	21,809
	zelená	16,122	21,880	19,116
	bílá	13,850	21,698	22,853
	hnědá	17,073	30,686	36,684



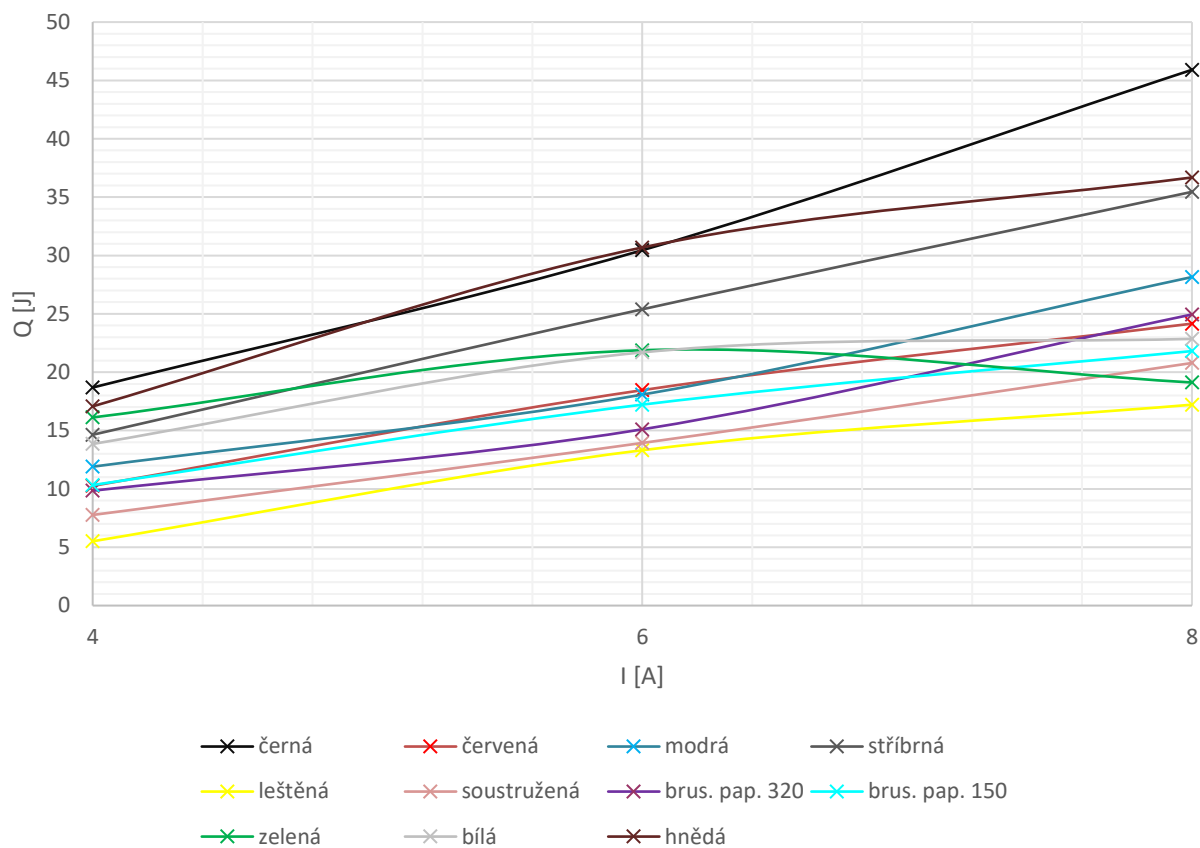
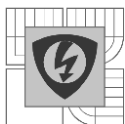
Tabulka 9 - Vypočítané absorbované teplo pro $l = 80 \text{ mm}$

l	[mm]	80		
l	[A]	4	6	8
$Q \text{ [J]}$	černá	18,687	30,452	45,909
	červená	10,256	18,460	24,158
	modrá	11,901	18,080	28,150
	stříbrná	14,639	25,389	35,453
	leštěná	5,509	13,313	17,215
	soustružená	7,767	13,935	20,788
	brus. papír 320	9,841	15,105	24,946
	brus. papír 150	10,331	17,218	21,809
	zelená	16,122	21,880	19,116
	bílá	13,850	21,698	22,853
	hnědá	17,073	30,686	36,684

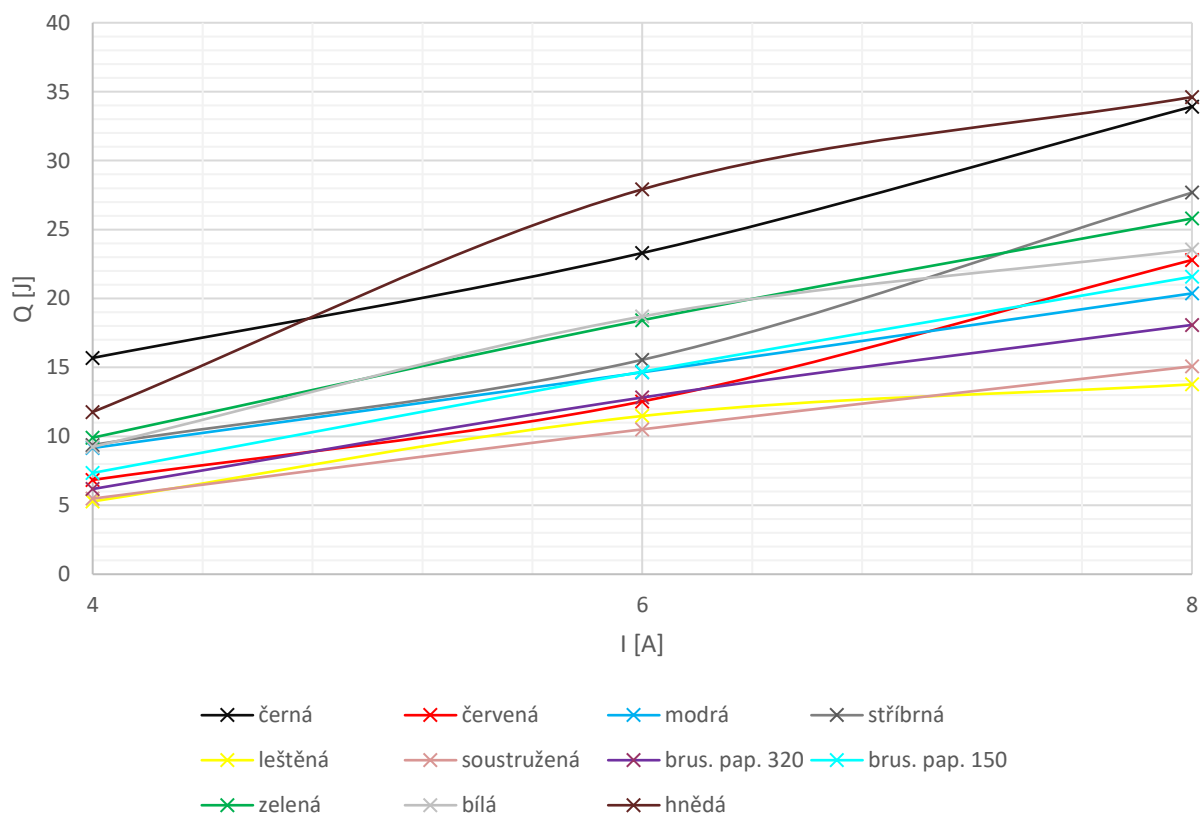
Vypočítané hodnoty tepla byly vyneseny do grafů. V prvním grafu byla vynesena závislost tepla Q na velikosti proudu I při vzdálenosti $l = 60 \text{ mm}$. V druhém grafu byla vynesena závislost tepla na proudu při vzdálenosti $l = 70 \text{ mm}$, ve třetím grafu byla vzdálenost $l = 80 \text{ mm}$.



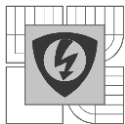
Obrázek 29 - Závislost tepla na proudu při vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku $l = 60 \text{ mm}$



Obrázek 30 - Závislost tepla na proudu při vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku $l = 70$ mm



Obrázek 31 - Závislost tepla na proudu při vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku $l = 80$ mm



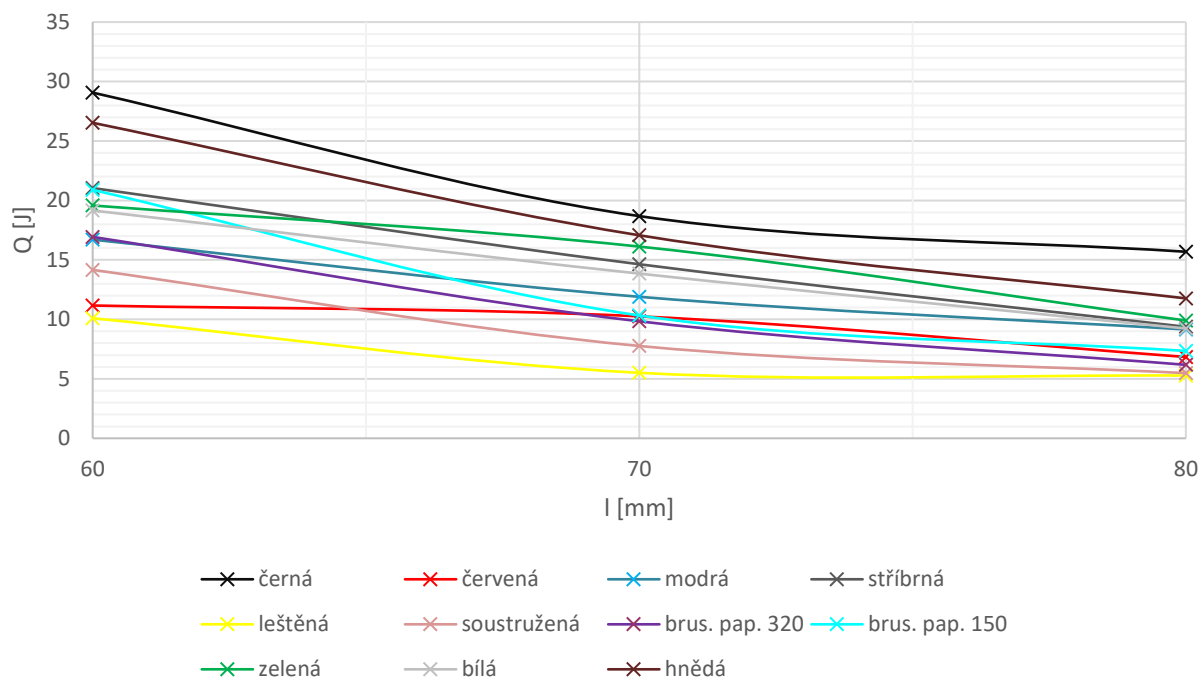
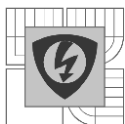
Závislost přijatého tepla zkoumanými vzorky na velikosti proudu, který prochází elektrickým obloukem lze vidět na (*Obrázek 31, Obrázek 30 a Obrázek 31*). Měď je charakterizována dobrou tepelnou vodivostí. Tepelný odpor je malý a tepelný tok velký. Můžeme zde pozorovat, že s rostoucím proudem roste absorbované teplo vzorku mědi. Což je dáno tím, že při zvýšení proudu elektrickým obloukem, respektive zvýšením výkonu elektrického oblouku, oblouk začne do okolí odevzdávat větší množství energie. V našem případě je nejpodstatnější energie ve formě tepla. Růst absorbovaného tepla vzorkem můžeme vidět v tabulce 3 a tabulce 4 a tabulce 5. Na grafech je patrné, že nárůst teploty vzorku je lineární. Z teorie víme (*Obrázek 28*), že oteplovací křivka dosáhne maxima a ustálí se. V tomto experimentálním měření maximálního oteplení nechceme dosáhnout z důvodu destruktivních účinků vysoké teploty na izolační materiál, hlavním důvodem však byla minimalizace chyby odvodem tepla ze vzorku do okolí.

V prvním grafu (*Obrázek 29*) můžeme pozorovat závislost absorbovaného tepla na proudu při vzdálenosti $l = 60$ mm. Při navyšování proudu je vidět, že absorbované teplo lineárně roste. Nejvíce tepla absorboval vzorek, na který byla nanесena tenká vrstva černé barvy. Nejméně tepla absorboval vzorek s leštěnou plochou. U červeného vzorku nastala odchylka při měření na $I = 4$ A.

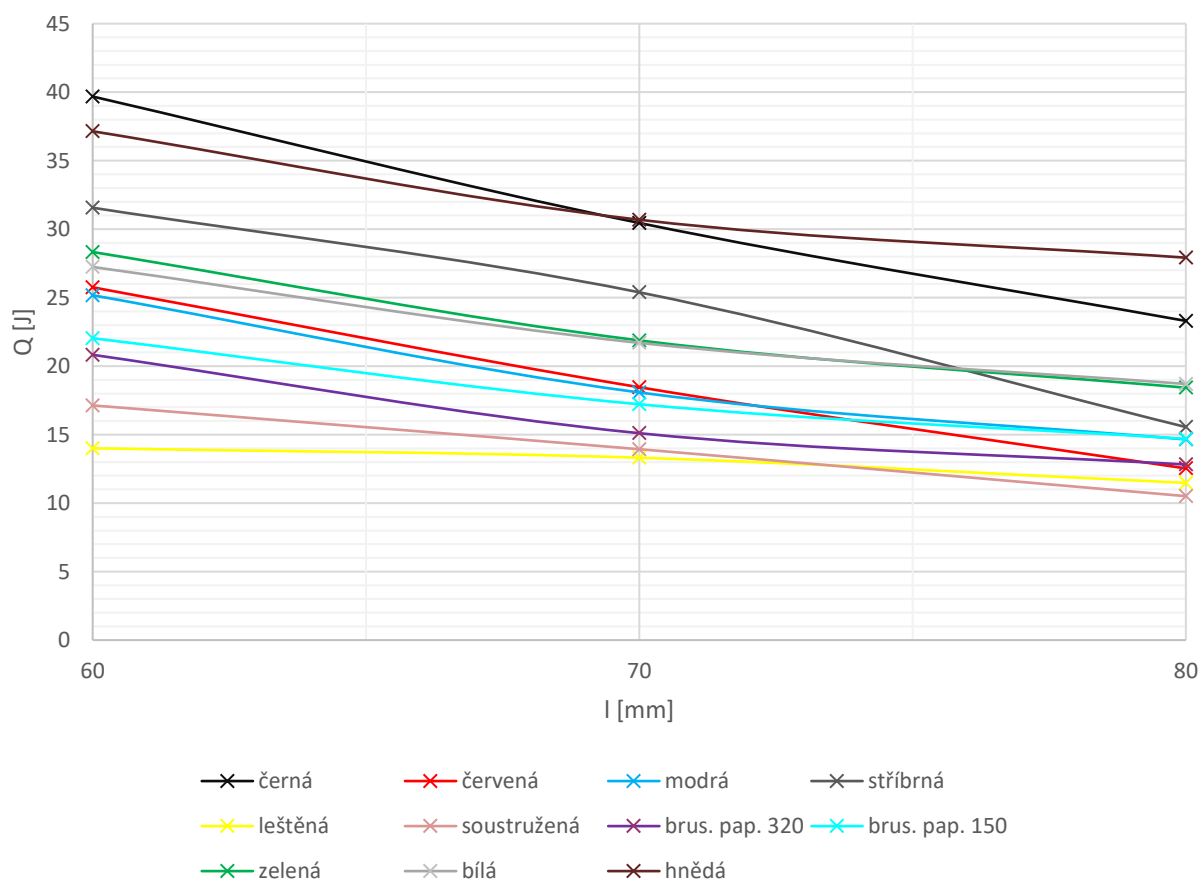
Ve druhém grafu (*Obrázek 30*) je vynesena závislost absorbovaného tepla na proudu při vzdálenosti $l = 70$ mm. Zde si můžeme povšimnout vzorku potřeného zelenou barvou, kde při $I = 8$ A nastala chyba měření. Vzorek absorboval při $I = 6$ A větší množství tepla než při vyšším proudu $I = 8$ A.

Ve třetím grafu (*Obrázek 31*) je vynesena závislost absorbovaného tepla na proudu při vzdálenosti $l = 80$ mm. Na tomto grafu nejvíce tepla absorboval hnědý vzorek, u kterého při $I = 6$ A nastala chyba měření.

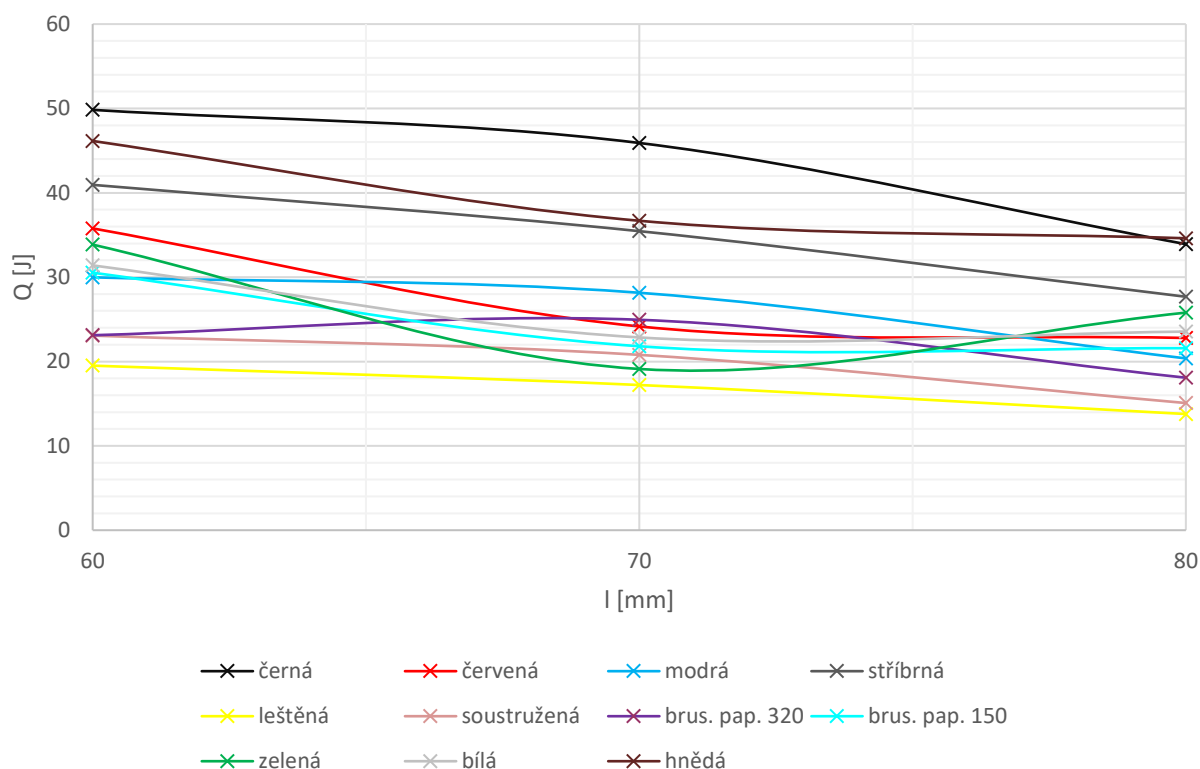
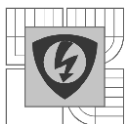
Na dalších grafech je vynesena závislost absorbovaného tepla Q na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku l , a to při třech různých proudech I . Na prvním grafu je proud $I = 4$ A, na druhém je proud $I = 6$ A a na třetím grafu je závislost při $I = 8$ A.



Obrázek 32 - Závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 4 \text{ A}$



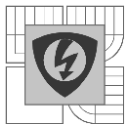
Obrázek 33 - Závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 6 \text{ A}$



Obrázek 34 - Závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 8 \text{ A}$

Na grafech (Obrázek 32, Obrázek 33 a Obrázek 34) je vynesena závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při konstantním proudu. Vzdálenost vzorku od elektrického oblouku se zvětšovala a to tak, že $l = 60 \text{ mm}$, $l = 70 \text{ mm}$ a $l = 80 \text{ mm}$. S rostoucí vzdáleností mezi elektrickým obloukem a vzorkem velikost absorbovaného tepla klesá. Čím dále se vzorek nachází, tím méně energie dopadá na jeho plochu. Naopak více energie z elektrického oblouku je odváděno do okolí.

Na prvním grafu (Obrázek 32) je závislost měřena při nejmenším proudu protékajícím elektrickým obloukem $I = 4 \text{ A}$. Druhý graf, závislost tepla na vzdálenosti vzorku od elektrického oblouku při proudu $I = 6 \text{ A}$ (Obrázek 33). Na posledním grafu (Obrázek 34) je vynesena závislost při nejvyšším proudu $I = 8 \text{ A}$.



6 ZÁVĚR

V úvodní části práce byla rozebrána problematika obloukových pecí. Obloukové pece se dělí na pece s přímým obloukem, pece s nepřímým obloukem a pece se zakrytým obloukem. Pece s přímým obloukem mají elektrody ponořené přímo ve vsázce a oblouk hoří mezi elektrodami a vsázkou. Pece s přímým obloukem se používají k rafinaci tekuté oceli. U pece s nepřímým obloukem oblouk hoří mezi dvěma elektrodami, z nichž ani jedna není vsázkou. Tyto pece s nepřímým obloukem se využívají k výrobě slitin mědi. Pece se zakrytým obloukem jsou elektrody ponořené ve vsázce a oblouk je zcela zakryt, toho se využívá při výrobě feroslitin a karbidů.

Druhou skupinou byly svářečské technologie. Svařování za pomoci elektrického oblouku dělíme na ruční svařování obalovanou elektrodou, svařování netavicí se elektrodou v atmosféře inertního plynu – TIG a svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu metodou MIG/MAG. Metody se liší tím, jestli mají tavnou nebo netavnou elektrodu a jestli mají ochrannou atmosféru. Ochranné atmosféry je využíváno u metody TIG a MIG/MAG. MIG/MAG a ruční svařování má tavnou elektrodu. Svařování obalovanou elektrodou je nejjednodušší způsob svařování elektrickým obloukem. Je často využíván veřejností, a to z důvodu nízkých nákladů. Svařování metodou TIG je využíváno při ručním svařování mědi, hořčíku a korozivzdorných ocelí. Metoda MIG/MAG má tu výhodu, že ji lze plně mechanizovat, tudíž se dá využít v automatizovaném provozu. Nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena svařovací aparatury.

Byla provedena analýza přenosu tepla do blízkých předmětů. Přenos tepla z oblouku do okolních předmětů probíhá sáláním, prouděním a vedením. V práci byly popsány všechny tři druhy přenosu tepla.

Závěrečná část práce se zabývala experimentálním měřením přenosu tepla z elektrického oblouku do blízkých předmětů. Tato část práce odhalila zajímavé poznatky. Měřicí pracoviště bylo popsáno a schematicky zakresleno. Bylo vytvořeno jedenáct vzorků. Postup jejich výroby je popsán podrobně v šesté kapitole. Každý vzorek byl jednotlivě měřen při třech velikostech proudu $I = 4 \text{ A}$, $I = 6 \text{ A}$ a $I = 8 \text{ A}$. Při jednotlivých proudech byly proměřeny tři vzdálenosti. Vzorek byl postupně přibližován s krokem 10 mm, a to z $l = 80 \text{ mm}$, přes $l = 70 \text{ mm}$, na $l = 60 \text{ mm}$. Při každé vzdálenosti byl vzorek vystaven před elektrický oblouk po dobu $t = 60 \text{ s}$.

Z grafů je patrné, že nejvíce tepla absorbovaly vzorky potřené vrstvou barvy. To je zapříčiněno vyšší emisivitou barvy, než má samotná měď. Nejvíce tepla absorboval vzorek, na který byla nanесena černá barva. To potvrzuje teoretické předpoklady, že absolutně černé těleso je ideální těleso, které pohlcuje všechno záření dopadající na jeho plochu. Náš vzorek s černou ploškou se nejvíce přibližuje absolutně černému tělesu. Druhých nejvyšších hodnot absorbovaného tepla dosahoval vzorek s hnědou vrstvou barvy. Při měření za proudu $I = 6 \text{ A}$ a vzdálenosti vzorku od oblouku $l = 80 \text{ mm}$ dokonce velikost absorbované teploty převyšovala černý vzorek což bylo způsobeno chybou měření. Následoval vzorek potřen stříbrnou barvou. Čtvrtých nejvyšších hodnot dosahoval vzorek se zelenou vrstvou barvy. Po zelené následoval vzorek potřený bílou barvou. Od tohoto vzorku bylo očekáváno, že z natřených vzorků absorbuje tepla nejméně. Toto se při měření nepotvrdilo. Je to pravděpodobně způsobeno nanесením silnější vrstvy barvy, než je velikost vrstvy u ostatních vzorků. Nejnižších hodnot absorbovaného tepla ze vzorků s nanесenou barvou dosahovaly vzorky s červenou a modrou barvou.



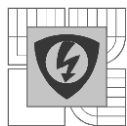
Následovaly vzorky upravené brusným papírem. Více tepla absorboval vzorek upraven brusným papírem o zrnitosti 150, to znamená vzorek s hrubším povrchem plošky. Vzorek, který byl upraveno jemnějším brusným papírem o zrnitosti 320 absorboval tepla méně. Následoval vzorek, který byl obráběn na fréze. Nejmenších hodnot absorbovaného tepla dosahoval vzorek, který měl plošku vyleštěnou. U těchto čtyř vzorků se plně potvrdily teoretické předpoklady. To znamená že čím vyšší je drsnost povrchu vystaveného záření oblouku, tím více tepelné energie je absorbováno do vzorku. Tedy při lesklé ploše je větší část tepelné energie odražena a vzorek absorbuje tepelné energie méně.

První tři grafy (*Obrázek 31, Obrázek 30 a Obrázek 31*) znázorňují závislost velikosti absorbovaného tepla na proudu procházejícím elektrickým obloukem při konstantní vzdálenosti mezi elektrickým obloukem a vzorkem. Toto měření proběhlo pro tři různé vzdálenosti. Větší výkon oblouku znamenal větší množství vyzařené energie. Čím větší byl proud procházející elektrickým obloukem, tedy větší výkon, tím větší bylo množství absorbovaného tepla. Velikost absorbovaného tepla rostla konstantně se zvyšováním elektrického proudu v obvodu oblouku. Chyba nastala u zeleného vzorku při vzdálenosti $l = 70$ mm. Byla naměřena větší hodnota absorbovaného tepla při $I = 6$ A než při $I = 8$ A. Chyba mohla vzniknout mírným odkloněním vzorku od elektrického oblouku.

Na dalších třech grafech (*Obrázek 34, Obrázek 33 a Obrázek 34*) jsou vyneseny závislosti absorbovaného tepla vzorku na vzdálenosti mezi vzorkem a elektrickým obloukem při konstantním výkonu. To znamená konstantní proud procházející elektrickým obloukem. Každé měření proběhlo při třech různých velikostech proudů. Z grafu je patrné, že při oddalování vzorku od elektrického oblouku postupně klesá velikost absorbované tepelné energie. To je zapříčiněno tím, že energie z elektrického oblouku je vyzařována všemi směry a na plošku vzorku dopadá menší množství tepelné energie. Větší množství energie je naopak odváděno do okolí elektrického oblouku.

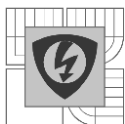
Nejvíce tepelné energie absorboval vzorek, který je natřen černou barvou a umístěn co nejbližší elektrickému oblouku, zatímco elektrický oblouk má největší výkon. Naopak nejnižších hodnot dosahuje naleštěný vzorek v největší vzdálenosti od elektrického oblouku, zatímco elektrický oblouk má nejnižší výkon.

Možné chyby měření mohly nastat u natřených vzorků tím, že nebyla nanášena rovnoměrná vrstva barvy po celé plošce vzorku. To znamená, že na místech s menší vrstvou barvy mohlo dojít k větší odrazivosti tepelné energie. Naopak na místech s větší vrstvou barvy mohlo dojít k větší absorpci tepelné energie. Jednotlivé vzorky se od sebe mohly také lišit velikostí barevné vrstvy nanášené na plošku vzorků. Další chyba mohla nastat při uložení vzorku do stojanu. Ploška vzorku mohla být mírně odkloněna od elektrického oblouku jak horizontálně, tak vertikálně. To by mělo za následek menší množství absorbované energie vzorkem, naopak by se zvýšila velikost energie odražené od plošky vzorku do okolí. Další chybou mohlo být kolísavé hoření elektrického oblouku. S kolísavým hořením kolísala úměrně výkon elektrického oblouku. To znamená, že kolísala velikost vyzařené energie z elektrického oblouku.



LITERATURA

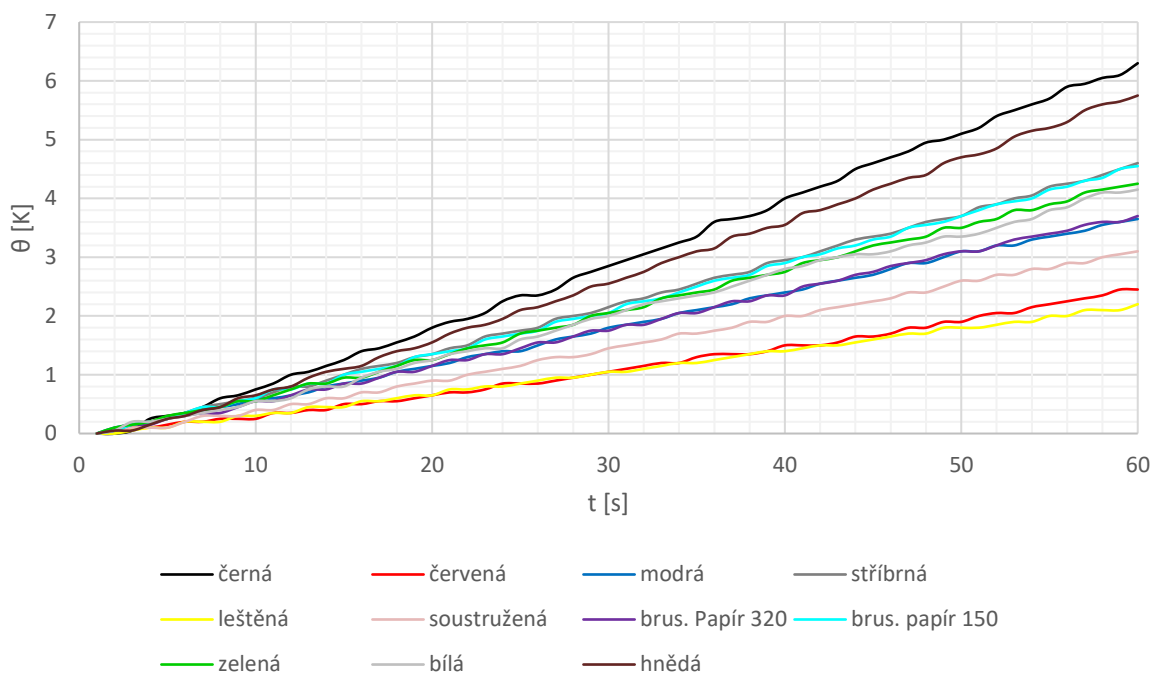
- [1] HAVELKA, Oto. Elektrické přístroje I. Praha: SNTL, 1985.
- [2] BAXANT, Petr; DRÁPELA, Jiří: *Užití elektrické energie*, Elektronický učební text, Brno 2007.
- [3] BUŠOV, Bohuslav. *Stejnoseměrný a střídavý oblouk a jejich zhášení*, Elektronický učební materiály, Brno VUT.
- [4] *Obloukové svařování obalenou elektrodou, svařování MMA, svařovací technika, svařovací invertor* [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/mma-rucne-obalenou-elektrodou>.
- [5] MINAŘÍK V.: Obloukové svařování. Scientia Praha 1998.
- [6] *Svařování TIG - základní seznámení* [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/>.
- [7] HALA, Petr. *Svařitelnost kovů*. Brno: SIAD, [2005]. 125 s.
- [8] ONDREJČEK, Peter. *Zvaranie oceli v ochrane plynov: tavici sa elektrodou*. Bratislava: ETERNA PRESS s.r.o., 2003. 204 s. ISBN 80-968359-5-5.
- [9] ŠIMEK, D. *Působení spínacího oblouku na konstrukci výkonového přístroje nn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc..
- [10] Heat transfer and efficiency. *BBC* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/aqa_pre_2011/energy/heatrev1.shtml
- [11] HORÁK, Zdeněk, Václav ŠINDELÁŘ a František KRUPKA. *Technická fyzika*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Teoretická knižnice inženýra.
- [12] Main Difference – Convection vs. Radiation. *Pediaa* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://pediaa.com/difference-between-convection-and-radiation/>
- [13] *Radwag* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.vahy-radwag.cz/AS-220-R2-22/Laboratorni-vahy>
- [14] *ALMEMO® Manual: For sensors and measuring instruments up to version 6*. 9th revised edition. 83607 Holzkirchen, Eichenfeldstr. 1, Germany: Ahlborn Mess - und Regelungstechnik GmbH, 2011.
- [15] *KAJMAN K* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://kajmank.cz/>
- [16] *FTP Plastics* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.feronathysen.cz/>
- [17] *TZN-info* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/>
- [18] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno, 2015. FEKT VUT.



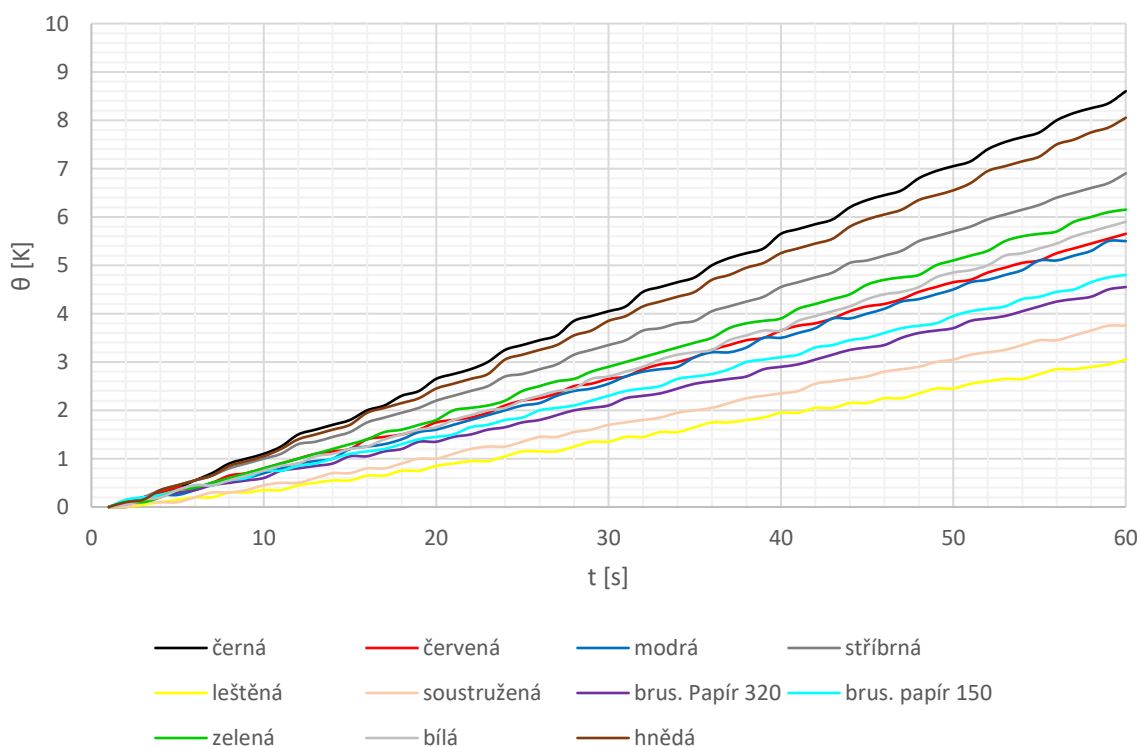
PŘÍLOHY

Příloha A

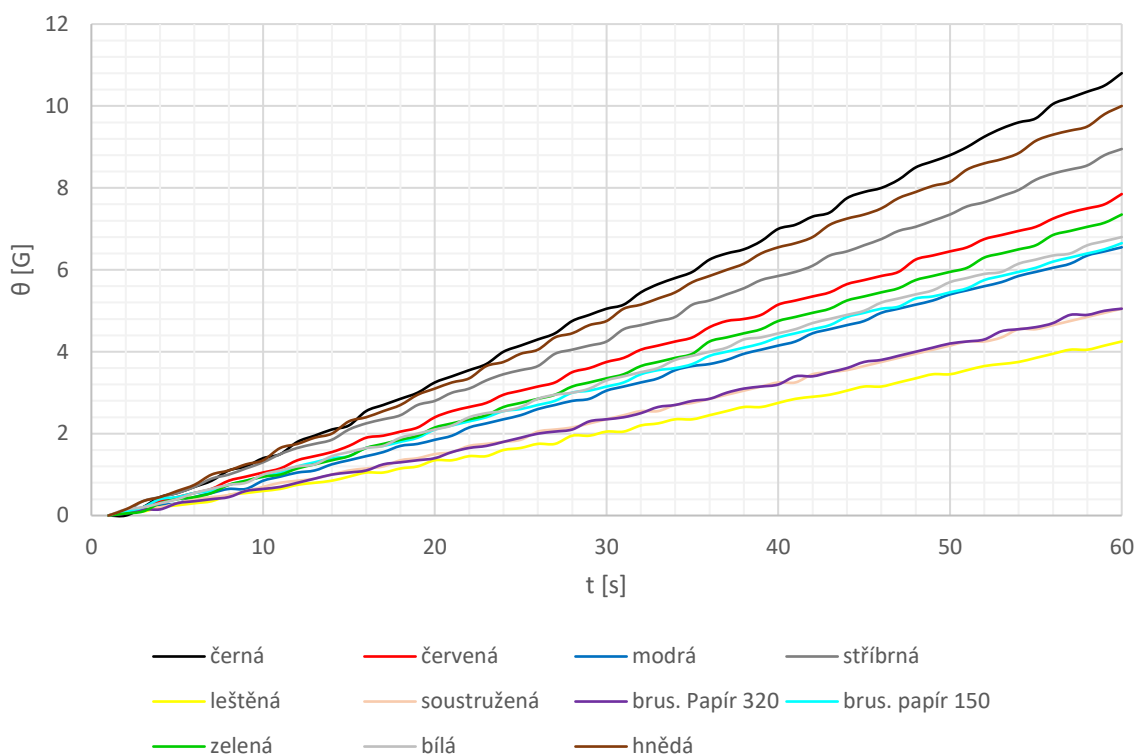
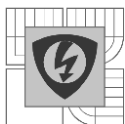
Oteplovací charakteristiky při $l = 60$ mm.



Obrázek 35 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 4$ A



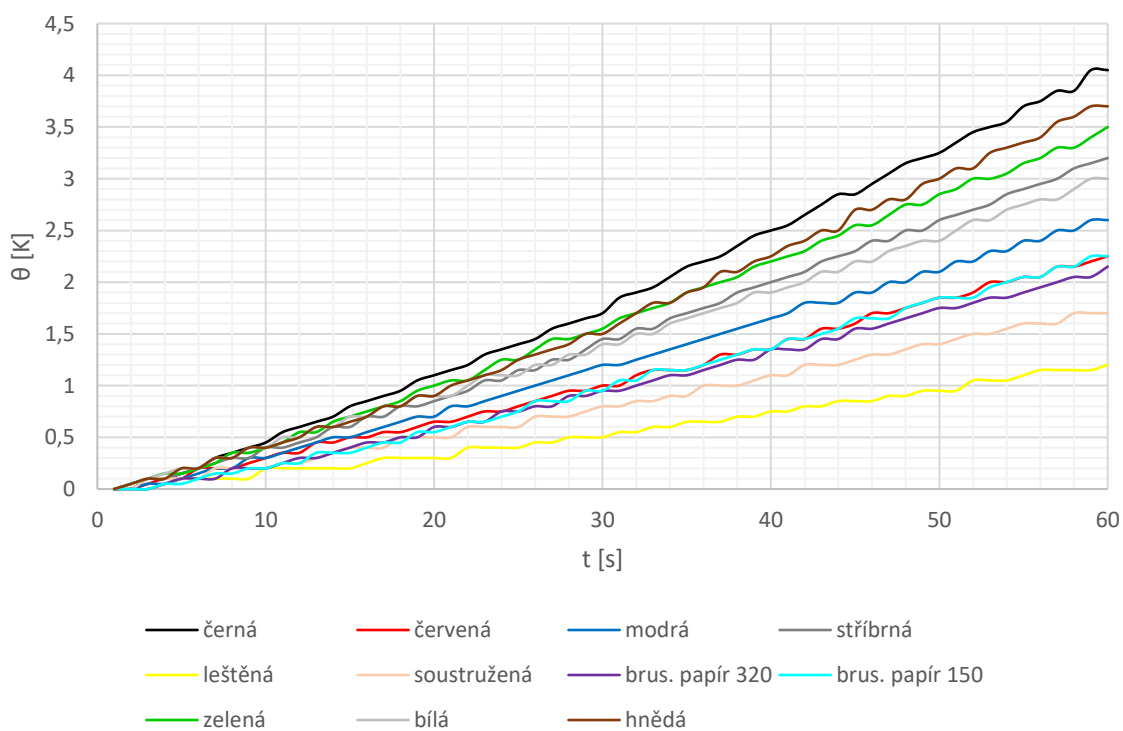
Obrázek 36 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 6$ A



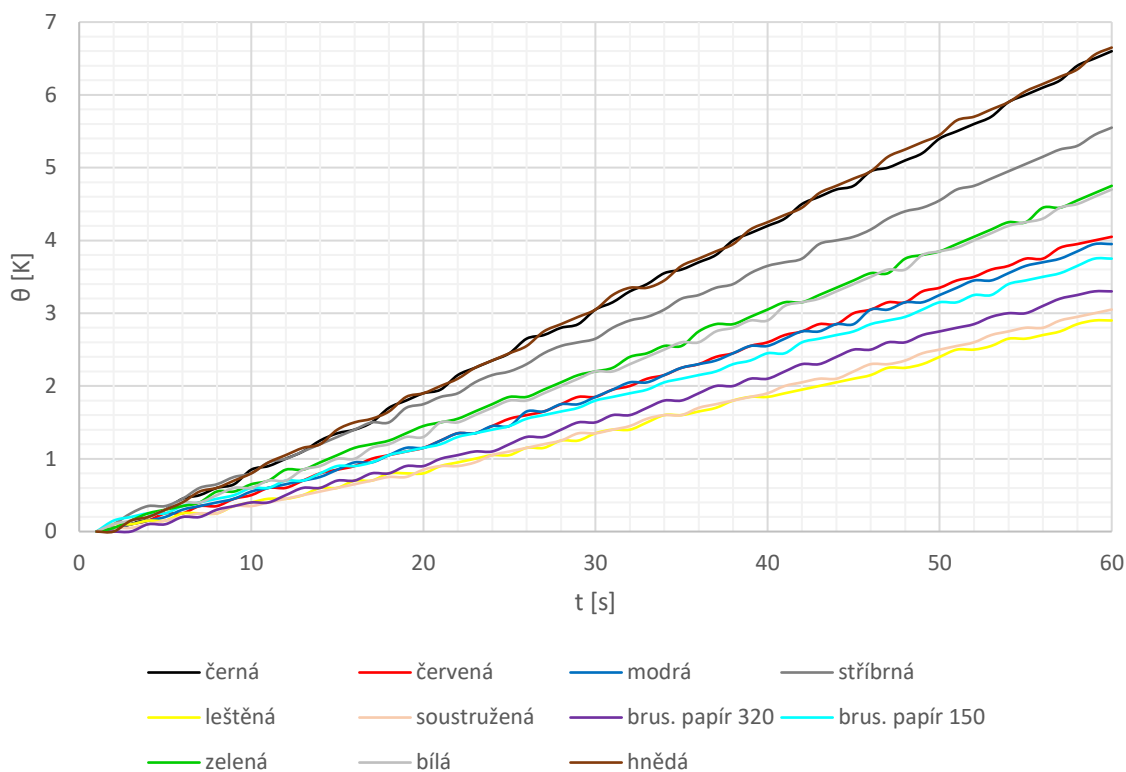
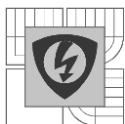
Obrázek 37 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 8$ A

Příloha B

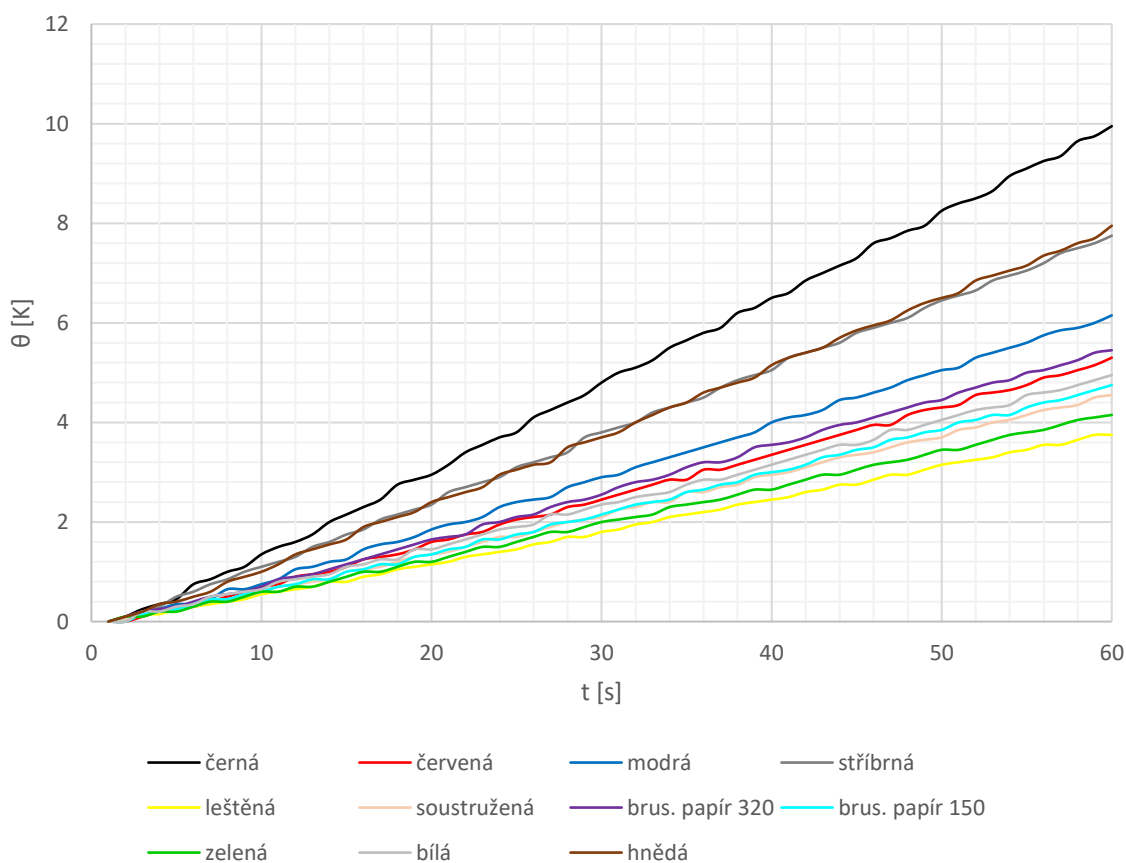
Oteplovací charakteristiky při $l = 70$ mm.



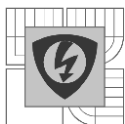
Obrázek 38 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 4$ A



Obrázek 39 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 6$ A

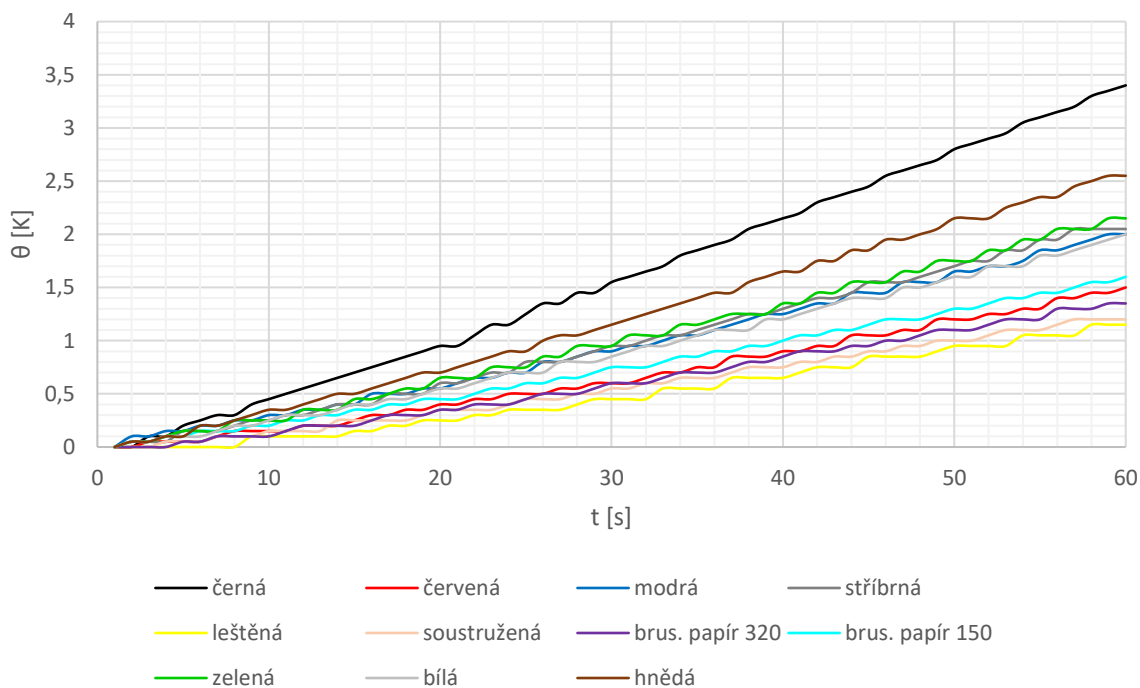


Obrázek 40 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 8$ A

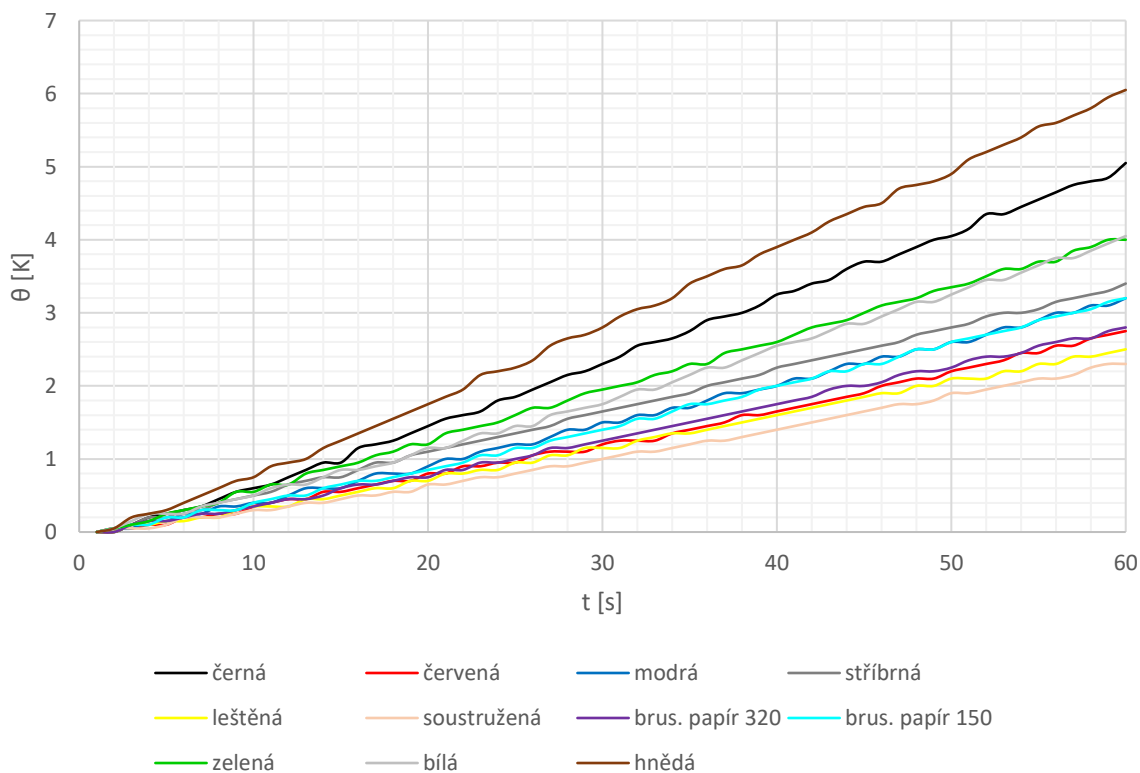


Příloha C

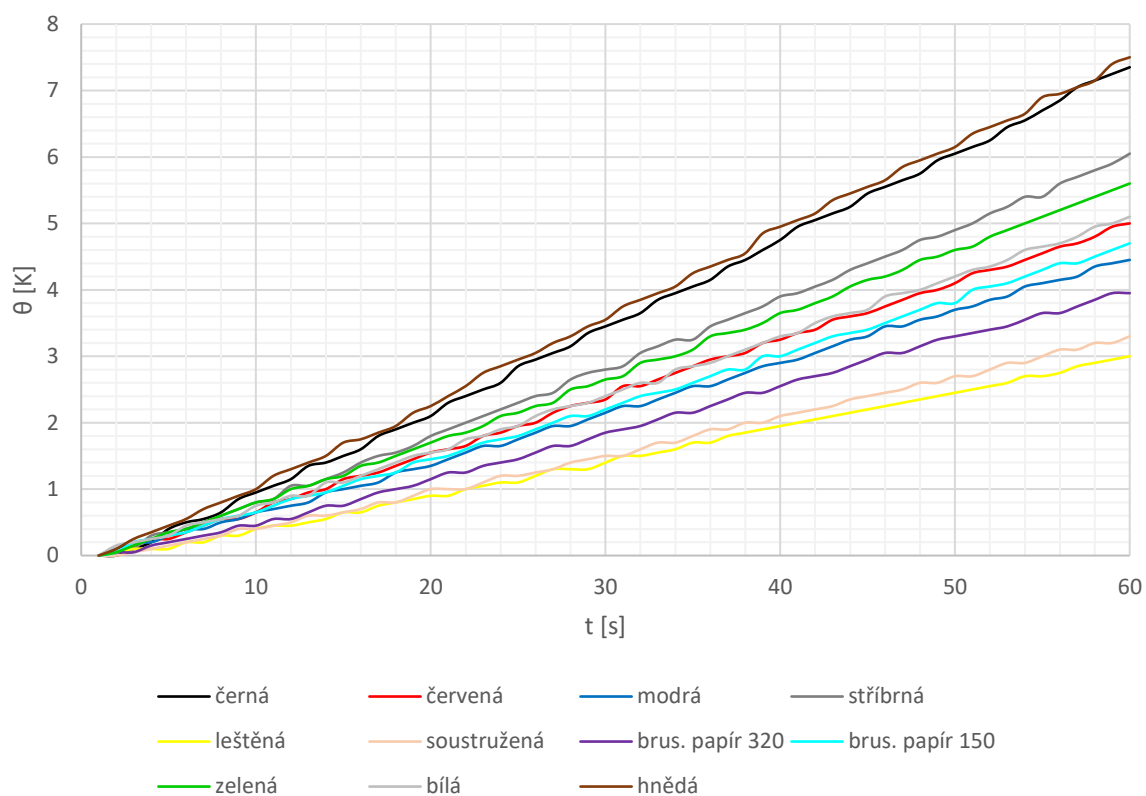
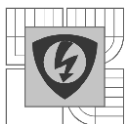
Oteplovací charakteristiky při $l = 80$ mm.



Obrázek 41 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 4$ A



Obrázek 42 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 6$ A



Obrázek 43 - Závislost oteplení vzorku na čase při $I = 8$ A